



**Cláudio José de
Almeida Carvalho da
Cruz**

**Comportamento e durabilidade de telhas cerâmicas
em ambiente marítimo**





**Cláudio José de
Almeida Carvalho da
Cruz**

**Comportamento e durabilidade de telhas cerâmicas
em ambiente marítimo**

Tese elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil e apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e da Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga, Investigadora Principal com Habilitação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, no âmbito do contrato de parceria entre a UA e o LNEC.

Para a Vanda

In memoriam

Avós Maria, José, Olinda e Francisco
José Amândio de Carvalho Lucas, Investigador do LNEC

o júri

presidente

Prof. Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Luís Barroso de Aguiar
professor associado com agregação da Universidade do Minho

Doutora Maria do Rosário da Silva Veiga
investigadora principal com habilitação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António Raimundo Mendes da Silva
professor auxiliar da Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

À Direcção do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), à Directora do Departamento de Materiais (DM), Eng.^a Adélia Rocha e ao Chefe de Núcleo de Materiais Pétreos e Cerâmicos (NPC) do DM, Eng.^o João Mimoso, por terem permitido a realização deste trabalho e por disponibilizarem as condições essenciais à realização do estudo.

À Reitoria da Universidade de Aveiro e ao Departamento de Engenharia Civil, por me permitirem realizar este trabalho no âmbito do Doutoramento em Engenharia Civil dessa Universidade.

Ao Eng.^o João Mimoso pela definição do tema da Tese, pelo apoio na preparação do plano de trabalhos e pelos contactos preliminares com o Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV).

Aos meus orientadores Eng.^a Maria do Rosário Veiga e Prof. Victor Ferreira.

A orientação da Eng.^a Maria do Rosário Veiga foi essencial para a realização deste trabalho. Estando aqui no LNEC partilhou comigo os bons e os menos bons momentos por que passam sempre os trabalhos desta natureza, incluindo os imponderáveis do trabalho experimental. Esteve sempre presente quando era necessário, apesar das múltiplas actividades que consegue realizar. O seu apoio, incentivo e optimismo foram fundamentais. O seu vasto campo de conhecimentos permitiu-lhe contribuir em todos os aspectos dos trabalhos.

Mesmo fisicamente distante, o Professor Victor Ferreira soube sempre estar presente, deslocando-se muitas vezes ao meu encontro. Promoveu sempre a continuidade dos contactos com o CTCV e com os fabricantes. O seu dinamismo foi contagiante, e pude sempre contar com as suas valiosas sugestões e com o seu incentivo e apoio.

Agradeço ao CTCV toda a informação disponibilizada relativa a casos de degradação de telhas em ambiente marítimo.

Aos fabricantes agradeço a oferta das telhas cerâmicas, a realização de visitas técnicas às fábricas e a informação relativa ao processo de fabrico.

Às colegas Eng.^a Teresa Gonçalves e Dra. Dória Costa, do NPC, que, para além da sua amizade e incentivo, me disponibilizaram a sua experiência e conhecimentos relativos à acção dos sais solúveis nos materiais porosos de construção. Por vezes a sua ajuda implicou sacrifícios pessoais.

Aos colegas do NPC que colaboraram na realização do trabalho experimental o meu sincero agradecimento pela amizade sempre demonstrada. A realização da Tese só foi possível com a colaboração e os conhecimentos dos Técnicos do LNEC Sr. Luís Nunes, Sr. João Ribeiro, Sr. João Júnior e Sr. José Costa.

À Chefe do Núcleo de Materiais Metálicos (NMM) do DM, Eng.^a Manuela Salta, ao Dr. Santos Silva e restantes colaboradores do NMM, onde foram realizados os ensaios de análise mineralógica por difractometria de raios X. Agradeço o apoio e sugestões dispensadas.

Ao Chefe do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) do Departamento de Edifícios (DED) do LNEC, Eng.^o Grandão Lopes, agradeço o interesse demonstrado no decorrer do trabalho e a disponibilização de alguns equipamentos.

À minha amiga e colega Eng.^a Sónia Costa e Silva agradeço todo o apoio dispensado durante os anos que já partilhamos no LNEC. Também agradeço a informação que disponibilizou relacionada com a manutenção de coberturas.

Agradeço aos meus pais, irmão, cunhada e sobrinha todo o apoio que me deram e terem suportado tantas vezes a minha ausência.

Para a Vanda o agradecimento especial. Sem ti nada seria possível.

palavras-chave

Durabilidade, telhas cerâmicas, ensaios acelerados, nevoeiro salino.

resumo

As telhas cerâmicas são muito utilizadas há séculos no revestimento de coberturas inclinadas em Portugal e em muitos outros países. Alguns casos de degradação acelerada têm vindo a afectar a durabilidade das telhas. Para avaliar o desempenho de telhas cerâmicas em ambiente marítimo foi desenvolvido um estudo experimental baseado em ensaios de envelhecimento artificial acelerado.

Este estudo compreende a caracterização de diversos tipos de telhas cerâmicas, o desenvolvimento e realização de ensaios de envelhecimento acelerado realizados em câmara de nevoeiro salino, a avaliação da degradação provocada pelos ensaios acelerados e a comparação com a degradação sofrida por telhas em exposição natural.

O estudo pretende reproduzir em laboratório os mecanismos de degradação observados em condições reais e identificar as características mais afectadas, procurando relações significativas entre grandezas relevantes medidas nos materiais antes e depois da acção dos agentes externos.

Pretende-se também, com base na análise comparativa dos resultados dos ensaios de envelhecimento sobre diferentes tipos de telhas, identificar parâmetros de composição e de fabrico que contribuem para a degradação e fornecer assim à indústria dados relevantes para melhorar a durabilidade das telhas.

keywords

Durability, clay roofing tiles, accelerated weathering tests, salt mist.

abstract

Clay roof tiles are largely used in traditional construction in Portugal. In coastal zones some cases of accelerated decay have been affecting the roofing tiles durability, apparently due to the exposition to a salt mist atmosphere.

To evaluate the performance of the clay roofing tiles subjected to a sea environment, an experimental study was carried out based on artificial accelerated weathering tests.

The study includes the roofing tiles characterization, the development of accelerated weathering tests, the evaluation of the weathering effect and also the comparison with roofing tiles that suffered natural weathering in coastal zones of Portugal.

The study aims at reproducing the pathology mechanisms observed in real conditions, and identifying the most affected characteristics.

The study of the accelerated weathering tests of several kinds of tiles also aims at identifying the parameters - of both composition and manufacture - having a higher contribution to the decay of roofing tiles to provide industry with relevant data to improve the tiles durability.

COMPORTAMENTO E DURABILIDADE DE TELHAS CERÂMICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

ÍNDICE DO TEXTO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos	4
1.3 Organização do texto	4
 CAPÍTULO 2 DEGRADAÇÃO E DURABILIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO POROSOS	7
2.1 Qualificação e durabilidade das telhas cerâmicas e das coberturas.....	7
2.2 Terminologia de formas de alteração e degradação	12
2.3 A degradação dos materiais de construção porosos provocada por sais solúveis.....	29
2.3.1 Introdução	29
2.3.2 Propriedades dos sais.....	31
2.3.3 Fontes de humidade e condições ambientais	33
2.3.4 Susceptibilidade dos materiais.....	34
2.3.5 Simulações experimentais de cristalização e dissolução de sais	35
2.3.6 Mecanismos de degradação	37
2.3.7 Cristalização de sais	38
2.4 Casos reais	43
 CAPÍTULO 3 ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE TELHAS CERÂMICAS.....	49
3.1 Tipos de telhas	49
3.2 Processos e tecnologias de fabrico	53
3.3 Influência de alguns parâmetros de fabrico nas propriedades das telhas e na sua durabilidade.....	61
3.3.1 Influência das matérias-primas no fabrico e propriedades dos materiais cerâmicos cozidos	61
3.3.2 Influência da temperatura de cozedura nas propriedades e durabilidade dos materiais cerâmicos.....	63

3.3.3 Influência da estrutura porosa na durabilidade de materiais porosos	66
3.3.4 Caracterização da durabilidade de materiais cerâmicos.....	73
 CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POROSOS DE CONSTRUÇÃO: COMPILAÇÃO, ANÁLISE CRÍTICA E SELECÇÃO DOS ENSAIOS	
4.1 Características hídricas.....	75
4.1.1 Procedimentos de ensaio de imersão de provetes	77
4.1.2 Características hídricas de materiais porosos de construção.....	85
4.2 Características mecânicas.....	101
4.3 Ensaio de cristalização de sais	105
 CAPÍTULO 5 ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO.....	
5.1 Planeamento da campanha experimental	115
5.2 Tipo de telhas e de provetes	117
5.3 Caracterização de provetes novos	119
5.3.1 Análise química e mineralógica	120
5.3.2 Absorção de água fria por imersão.....	127
5.3.3 Absorção de água sob vácuo, massas volúmicas e porosidade aberta	136
5.3.4 Coeficiente de saturação.....	147
5.3.5 Absorção de água por contacto superficial de esponja	154
5.3.6 Velocidade de propagação de ultra-sons - método indirecto	164
5.3.7 Porosimetria de mercúrio	171
5.3.8 Análise comparada das características de provetes novos	173
5.4 Ensaio em câmara de nevoeiro salino.....	177
5.4.1 Introdução.....	177
5.4.2 Ensaio contínuo de nevoeiro e secagem.....	177
5.4.2.1 Nevoeiro sem sal seguido de secagem	177
5.4.2.2 Nevoeiro com sal seguido de secagem.....	181

5.4.3 Ensaio preliminar cíclico de nevoeiro salino seguido de secagem	186
5.4.3.1 Introdução.....	186
5.4.3.2 Ensaio preliminar 1.....	189
5.4.3.3 Ensaio preliminar 2.....	197
5.4.3.4 Conclusões relativas aos ensaios preliminares	201
5.4.4 Ensaio cíclico de envelhecimento acelerado	205
5.4.4.1 Introdução.....	205
5.4.4.2 Ensaio cíclico de provetes do Fabricante 1	207
5.4.4.3 Ensaio cíclico de provetes do Grupo 1 do Fabricante 2	219
5.4.4.4 Ensaio cíclico de provetes do Grupo 2 do Fabricante 2	228
5.4.4.5 Conclusões relativas ao ensaio cíclico de envelhecimento acelerado.....	237
5.4.5 Ensaio composto de envelhecimento acelerado	240
5.4.5.1 Descrição do ensaio	240
5.4.5.2 Fase 1 - 13 ciclos seguidos de 10 dias de secagem	244
5.4.5.3 Fase 2 - 10 ciclos, pincelagem a seco e 11 dias de secagem	251
5.4.5.4 Fase 3 - 11 ciclos, pincelagem a seco, molhagem e 20 dias de secagem	264
5.4.5.5 Fase 4 - 15 ciclos seguidos de 44 dias de secagem e de pincelagem.....	288
5.4.5.6 Conclusões relativas ao ensaio composto de envelhecimento acelerado.....	316
5.5 Análise visual da degradação provocada pelo ensaio cíclico e pelo ensaio composto de envelhecimento acelerado.....	319
5.6 Caracterização de provetes após ensaio cíclico de envelhecimento acelerado	327
5.6.1 Preparação dos provetes	327
5.6.2 Variação de massa	328
5.6.3 Absorção de água fria por imersão	331

5.6.4 Absorção de água sob vácuo, massas volúmicas e porosidade aberta	338
5.6.5 Coeficiente de saturação.....	350
5.6.6 Absorção de água por contacto superficial de esponja	356
5.6.7 Velocidade de propagação de ultra-sons - método indirecto	360
5.6.8 Porosimetria de mercúrio	368
5.6.9 Teor de humidade higroscópica (HMC) e perfis de teor salino	369
5.6.10 Colorimetria	372
5.6.11 Análise dos resultados dos ensaios sobre provetes sujeitos ao ensaio cíclico de envelhecimento acelerado.....	374
5.7 Avaliação das consequências do envelhecimento acelerado.....	375
 CAPÍTULO 6 CONTRIBUIÇÃO PARA A DURABILIDADE DE TELHAS EM AMBIENTE MARÍTIMO.....	
6.1 Análise dos ensaios de envelhecimento acelerado.....	379
6.2 Contribuição para a melhoria do fabrico das telhas	381
 CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES	
7.1 Conclusões gerais	385
7.2 Análise do cumprimento dos objectivos	390
7.3 Desenvolvimentos futuros.....	392

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Periodicidade das operações de manutenção [2].....	10
Quadro 2 - Materiais pétreos e similares. Terminologia das formas de alteração e degradação. LNEC, ITPRC 2 [13].....	13
Quadro 3 - Defeitos em telhas cerâmicas. NP EN 1304 [6].....	16
Quadro 4 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo. NP EN 539-2 [14]	17
Quadro 5 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo. NF P 31-301 [15]	18
Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14])	21
Quadro 7 - Tipos de degradação provocados em telhas cerâmicas sujeitas a ensaios de nevoeiro salino e a exposição natural a atmosferas marítimas	28
Quadro 8 - Composição da água do mar [19].....	30
Quadro 9 - Humidade relativa de equilíbrio do Cloreto de Sódio.....	33
Quadro 10 - Pressões de cristalização teóricas do NaCl	40
Quadro 11 - Fracções granulométricas dos solos	61
Quadro 12 - Teores de fracções granulométricas adequadas para telhas cerâmicas	62
Quadro 13 - Tipos de características das matérias-primas e dos materiais cerâmicos cozidos determinadas no estudo [42].....	64
Quadro 14 - Relação entre a durabilidade e a absorção de água das telhas cerâmicas	68
Quadro 15 - Tipos de características das telhas determinadas no estudo [43]	70
Quadro 16 - Classificação da durabilidade face ao gelo segundo vários modelos propostos.....	71
Quadro 17 - Análise química por fluorescência de raios X (FRX)	121
Quadro 18 - Composição mineralógica qualitativa	122
Quadro 19 - Absorção de água fria de telhas do fabricante 1.....	127
Quadro 20 - Absorção de água fria de provetes do fabricante 1	129

Quadro 21 - Absorção de água fria de telhas inteiras do fabricante 2	130
Quadro 22 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2 ...	131
Quadro 23 - Absorção de água fria dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2	132
Quadro 24 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura e da absorção de água.....	135
Quadro 25 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes F1 NH ...	140
Quadro 26 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes F1 B.....	140
Quadro 27 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH..	141
Quadro 28 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B, F2 T2 NH e F2 T3 NH	142
Quadro 29 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, da absorção de água e dos resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo	145
Quadro 30 - Coeficiente de saturação dos provetes F1 NH do fabricante 1	147
Quadro 31 - Coeficiente de saturação dos provetes F1 B do fabricante 1	148
Quadro 32 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 NH e F2 B do fabricante 2	149
Quadro 33 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2	150
Quadro 34 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, da absorção de água, da porosidade, da massa volúmica e do coeficiente de saturação.....	154
Quadro 35 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes do fabricante 1	156
Quadro 36 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2	158
Quadro 37 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2	159
Quadro 38 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, absorção de água, porosidade, massa volúmica, coeficiente de saturação e água absorvida após contacto de esponja	162
Quadro 39 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1	165

Quadro 40 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2	167
Quadro 41 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2	168
Quadro 42 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, absorção de água, porosidade, massa volúmica, coeficiente de saturação, água absorvida após contacto de esponja e velocidade de propagação de ultra-sons	169
Quadro 43 - Características médias dos tipos de provetes	173
Quadro 44 - Massa seca das telhas e teor de água após nevoeiro sem sal e após secagem.....	180
Quadro 45 - Absorção de água das telhas do fabricante 1	180
Quadro 46 - Variação de massa das telhas do fabricante 1 após 48 h de nevoeiro salino.	182
Quadro 47 - Absorção de água dos provetes usados nos ensaios preliminares.....	188
Quadro 48 - Degradação sofrida pelos provetes durante o ensaio preliminar 1.....	192
Quadro 49 - Degradação sofrida pelos provetes durante o ensaio preliminar 2.....	200
Quadro 50 - Tipo e número de provetes sujeitos a ciclos de nevoeiro salino/secagem	206
Quadro 51 - Inspeção visual dos provetes do fabricante 1 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem	211
Quadro 52 - Inspeção visual dos provetes do fabricante 1 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem	215
Quadro 53 - Provetes do grupo 1 do fabricante 2 colocados na câmara no início do ensaio	219
Quadro 54 - Inspeção visual dos provetes do grupo 1 do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem	223
Quadro 55 - Inspeção visual dos provetes do grupo 1 do fabricante 2 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem	227
Quadro 56 - Inspeção visual dos provetes do grupo 2 do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem	231
Quadro 57 - Inspeção visual dos provetes do grupo 2 do fabricante 2 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem	236
Quadro 58 - Formas de alteração e degradação - provetes do fabricante 1.....	238

Quadro 59 - Formas de alteração e degradação - provetes do fabricante 2	239
Quadro 60 - Provetes sujeitos ao ensaio composto	243
Quadro 61 - Inspeção visual nos 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1	246
Quadro 62 - Secagem durante 10 dias na fase 1	248
Quadro 63 - Inspeção visual após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2	253
Quadro 64 - Pincelagem a seco 1, após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2	255
Quadro 65 - Secagem durante 11 dias na fase 2	259
Quadro 66 - Estado da superfície dos provetes no fim da fase 2 do ensaio composto	263
Quadro 67 - Inspeção visual após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3	266
Quadro 68 - Camadas de sal acumuladas nas superfícies dos provetes	272
Quadro 69 - Pincelagem a seco 2, após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3	273
Quadro 70 - Secagem durante 20 dias na fase 3	283
Quadro 71 - Variação de massa dos provetes decorrentes das secagens das fases 1, 2 e 3	285
Quadro 72 - Inspeção visual após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4	291
Quadro 73 - Secagem durante 44 dias na fase 4	296
Quadro 74 - Pincelagem a seco 3, após 15 ciclos de nevoeiro/secagem e 44 dias de secagem da fase 4	302
Quadro 75 - Variação de massa dos provetes decorrentes das secagens das fases 3 e 4 ..	310
Quadro 76 - Variação de massa dos provetes decorrente do ensaio composto.....	315
Quadro 77 - Formas de alteração e degradação de provetes do fabricante 1	323
Quadro 78 - Formas de alteração e degradação de provetes do fabricante 2	324
Quadro 79 - Variações de massa dos provetes do fabricante 1	328
Quadro 80 - Variações de massa dos provetes do fabricante 2.....	329
Quadro 81 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento.....	332
Quadro 82 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2 antes e após envelhecimento	334
Quadro 83 - Absorção de água fria dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento	335
Quadro 84 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F1 NH..	339
Quadro 85 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F1 B.....	340

Quadro 86 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH..	342
Quadro 87 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 T2 NH.....	343
Quadro 88 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B	345
Quadro 89 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 T3 NH.....	346
Quadro 90 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 H.....	348
Quadro 91 - Comparação das absorções de água de provetes F2 NH e F2 H.....	348
Quadro 92 - Absorções de água por imersão e sob vácuo dos provetes F2 H.....	349
Quadro 93 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 1	350
Quadro 94 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 NH do fabricante 2.....	351
Quadro 95 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 B, F2 T2 NH e F2 T3 NH	352
Quadro 96 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 H do fabricante 2	353
Quadro 97 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes degradados e novos do fabricante 1	357
Quadro 98 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes degradados e novos do fabricante 2.....	358
Quadro 99 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1	361
Quadro 100 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2	364
Quadro 101 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH.....	365
Quadro 102 - Teor de NaCl	372

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Degradação natural - caso 1	44
Figura 2 - Degradação natural - caso 2	44
Figura 3 - Degradação natural - caso 3	45
Figura 4 - Degradação natural - caso 4	46
Figura 5 - Telha lusa ou de aba e canudo [2]	49
Figura 6 - Telha lusa ou de aba e canudo (tardoz) [2]	50
Figura 7 - Telha marselha [2]	50
Figura 8 - Telha marselha (tardoz) [2]	51
Figura 9 - Telha de canudo [2]	51
Figura 10 - Telha romana [2]	52
Figura 11 - Telha plana [2, 35]	52
Figura 12 - Esquema genérico do processo de fabrico das telhas	54
Figura 13 - Prensa revólver múltipla [1]	56
Figura 14 - Disposição das telhas nos vagões unidas com arames (a) e colocadas em suportes refractários (b) [1]	58
Figura 15 - Curva de cozedura em forno túnel [1]	60
Figura 16 - Determinação da absorção de água [14]	78
Figura 17 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 1 [67]	94
Figura 18 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 2 com moldura sobre o provete [67]	95
Figura 19 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 2 com moldura em torno do provete [67]	96
Figura 20 - Determinação da absorção de água a baixa pressão [53]	98
Figura 21 - Medição de velocidades de ultra-sons. Métodos de transmissão directa e de transmissão indirecta ou de superfície [70]	103
Figura 22 - Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons utilizando o método indirecto [70]	104
Figura 23 - Esquema de colocação dos transdutores exponenciais para medição da velocidade de propagação de ultra-sons pelo método indirecto	104
Figura 24 - Tipo de provetes ensaiados	119

Figura 25 - Difractogramas de amostras das telhas do fabricante 1.....	123
Figura 26 - Difractogramas de amostras das telhas do fabricante 2.....	123
Figura 27 - Difractogramas de amostras das telhas vermelhas do fabricante 2.....	124
Figura 28 - Difractogramas de amostras das telhas do modelo 1 do fabricante 2.....	125
Figura 29 - Difractogramas de amostras das telhas vermelhas dos dois fabricantes	125
Figura 30 - Difractogramas de amostras das telhas brancas dos 2 fabricantes	126
Figura 31 - Ensaio de absorção de água fria por imersão de telhas	128
Figura 32 - Ensaio de absorção de água fria por imersão de provetes	128
Figura 33 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1	130
Figura 34 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2	133
Figura 35 - Absorção de água fria dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2.....	133
Figura 36 - Absorção de água fria de todos os tipos de provetes do fabricante 2 (gráfico global)	134
Figura 37 - Valores médios da absorção de água fria	135
Figura 38 - Imersão em água sob vácuo e balança hidrostática	138
Figura 39 - Pesagem hidrostática e pesagem ao ar.....	138
Figura 40 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes do fabricante 1	141
Figura 41 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2.....	143
Figura 42 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2.....	143
Figura 43 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes do fabricante 2 (gráfico global)	144
Figura 44 - Valores médios da absorção de água por imersão e dos resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo	145
Figura 45 - Coeficiente de saturação dos provetes do fabricante 1	148
Figura 46 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2 ..	151
Figura 47 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2.....	151
Figura 48 - Coeficiente de saturação dos provetes do fabricante 2 (gráfico global).....	152

Figura 49 - Valores médios das absorções de água, do coeficiente de saturação e da porosidade aberta	153
Figura 50 - Ensaio de absorção de água por contacto superficial de esponja	155
Figura 51 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes do fabricante 1	157
Figura 52 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2	160
Figura 53 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2	160
Figura 54 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes do fabricante 2 (gráfico global)	161
Figura 55 - Valores médios das absorções de água, da porosidade aberta e da água absorvida por contacto de esponja	162
Figura 56 - Aparelho e esquema para determinação da velocidade de propagação de ultra-sons.....	164
Figura 57 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes novos do fabricante 1	166
Figura 58 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes novos do fabricante 2	166
Figura 59 - Valores médios das absorções de água, da porosidade aberta, da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação de ultra-sons	169
Figura 60 - Porosimetria de mercúrio de provetes novos.....	172
Figura 61 - Câmara de nevoeiro salino.....	177
Figura 62 - Telhas do fabricante 1 antes do ensaio de nevoeiro sem sal.....	178
Figura 63 - Variação de massa de telhas do fabricante 1 sob nevoeiro sem sal durante 60 h	178
Figura 64 - Secagem a 35 °C de telhas do fabricante 1 após nevoeiro sem sal	179
Figura 65 - Variação de massa de telhas do fabricante 1 sob nevoeiro com sal durante 48 h	182
Figura 66 - Variação de massa sob nevoeiro sem sal e sob nevoeiro com sal	183
Figura 67 - Secagem a 35 °C durante 48 h de telhas do fabricante 1 após nevoeiro com sal	184
Figura 68 - Comparação da secagem a 35 °C após nevoeiro sem sal e nevoeiro com sal.	185
Figura 69 - Secagem em estufa não ventilada a 60 °C após nevoeiro com sal e secagem	185

Figura 70 - Provetes T3 B, T3 e T3 C.....	187
Figura 71 - Disposição dos provetes no ensaio preliminar 1 e no ensaio preliminar 2.....	187
Figura 72 - Variação de massa dos provetes T1, T2 e T3 nos ciclos de 24 horas.....	190
Figura 73 - Variação de massa dos provetes T3, T3 B e T3 C nos ciclos de 24 horas	191
Figura 74 - Evolução da degradação do provete T1 no ensaio preliminar 1	193
Figura 75 - Provete T2 no ensaio preliminar 1.....	194
Figura 76 - Evolução da degradação do provete T3 no ensaio preliminar 1	194
Figura 77 - Degradação na aba do provete T3 após ensaio preliminar 1	195
Figura 78 - Evolução da degradação do provete T3 B no ensaio preliminar 1	195
Figura 79 - Evolução da degradação do provete T3 B no ensaio preliminar 1 (cont.)	196
Figura 80 - Evolução da degradação do provete T3 C no ensaio preliminar 1	196
Figura 81 - Variação de massa dos provetes F1NH1, T2 e T3 nos ciclos de 48 horas	198
Figura 82 - Variação de massa dos provetes T3, T3 B e T3 C nos ciclos de 48 horas	199
Figura 83 - Provete T2	202
Figura 84 - Provete T3	202
Figura 85 - Provete T3 B.....	203
Figura 86 - Provete T3 C.....	203
Figura 87 - Montagem dos provetes na câmara de nevoeiro salino	207
Figura 88 - Provetes do fabricante 1 no início do ensaio	207
Figura 89 - Provetes F1 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	208
Figura 90 - Provetes F1 B após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	209
Figura 91 - Provetes F1 H após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	210
Figura 92 - Provetes do fabricante 1 na câmara entre os ciclos 11 e 30	211
Figura 93 - Provetes F1 NH após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	212
Figura 94 - Provetes F1 B após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem...	213
Figura 95 - Provetes F1 H após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem ..	214
Figura 96 - Evolução da degradação do provete F1 H 3 C	216
Figura 97 - Evolução da degradação do provete F1 H 7 C	217
Figura 98 - Pormenores da degradação do provete F1 H 7 C após ensaio.....	218
Figura 99 - Provetes F1 H 3 C e F1 H 7 C após ensaio, pincelagem e extracção da camada superficial degradada.....	219
Figura 100 - Provetes F2 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	220

Figura 101 - Provetes F2 T2 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	221
Figura 102 - Provetes F2 H após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	222
Figura 103 - Provetes do grupo 1 do fabricante 2 na câmara entre os ciclos 11 e 30	223
Figura 104 - Provetes F2 NH após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	224
Figura 105 - Provetes F2 T2 NH após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	225
Figura 106 - Provetes F2 H após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.	226
Figura 107 - Provetes do grupo 2 do fabricante 2 no início do ensaio	228
Figura 108 - Provetes F2 B após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	229
Figura 109 - Provetes F2 T3 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem	230
Figura 110 - Provetes do grupo 2 do fabricante 2 na câmara entre os ciclos 11 e 30	232
Figura 111 - Provetes F2 B submetidos a 20 ciclos, após 10 e 20 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	232
Figura 112 - Provetes F2 T3 NH submetidos a 20 ciclos, após 10 e 20 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.....	233
Figura 113 - Provetes F2 B submetidos a 30 ciclos após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino.....	234
Figura 114 - Provetes F2 T3 NH submetidos a 30 ciclos após 20 e 30 ciclos de nevoeiro	235
Figura 115 - Provetes submetidos ao ensaio composto.....	243
Figura 116 - Provetes do fabricante 1 após 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1	244
Figura 117 - Provetes do fabricante 2 após 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1	245
Figura 118 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 10 dias da fase 1	248
Figura 119 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 1	249
Figura 120 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 1	250
Figura 121 - Provetes do fabricante 1 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2	251
Figura 122 - Provetes do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2	252
Figura 123 - Perda de massa na pincelagem a seco 1 em relação à massa seca.....	256
Figura 124 - Provetes do fabricante 1 após pincelagem da fase 2.....	257
Figura 125 - Provetes do fabricante 2 após pincelagem da fase 2.....	258

Figura 126 - Variação de massa dos provetes mais degradados da fase 2 durante as secagens da fase 1 e da fase 2.....	260
Figura 127 - Variação de massa dos provetes menos degradados da fase 2 durante as secagens da fase 1 e da fase 2.....	261
Figura 128 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 2	261
Figura 129 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 2	262
Figura 130 - Provetes do fabricante 1 após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3	264
Figura 131 - Provetes do fabricante 2 após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3	265
Figura 132 - Evolução da degradação localizada do provete F2 B 10 B nos ciclos da fase 3.....	269
Figura 133 - Degradação localizada do provete F2 B 11 B nos ciclos da fase 3	270
Figura 134 - Pormenores da degradação dos provetes F1 B 17 D e F2 T2 NH 10 B após ciclos da fase 3	271
Figura 135 - Perda de massa nas pincelagens a seco 1 e 2 em relação à massa seca.....	276
Figura 136 - Provetes do fabricante 1 após pincelagem a seco da fase 3	278
Figura 137 - Provetes do fabricante 2 após pincelagem a seco da fase 3	279
Figura 138 - Variação de massa dos provetes do fabricante 1 durante as pincelagens e molhagem da fase 3	280
Figura 139 - Variação de massa dos provetes F2 NH e F2 B do fabricante 2 durante as pincelagens e molhagem da fase 3	280
Figura 140 - Variação de massa dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2 durante as pincelagens e molhagem da fase 3	281
Figura 141 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 20 dias da fase 3	282
Figura 142 - Variação de massa dos provetes mais degradados durante a secagem da fase 3.....	284
Figura 143 - Variação de massa dos provetes menos degradados durante a secagem da fase 3.....	284
Figura 144 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 3	286
Figura 145 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 3	287
Figura 146 - Provetes do fabricante 1 após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4.....	288
Figura 147 - Provetes do fabricante 2 após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4.....	289

Figura 148 - Evolução da degradação localizada do provete F2 B 11 B nos ciclos da fase 4	294
Figura 149 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 44 dias da fase 4	295
Figura 150 - Variação de massa dos provetes mais degradados durante a secagem da fase 4	296
Figura 151 - Variação de massa dos provetes menos degradados durante a secagem da fase 4	297
Figura 152 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 4	297
Figura 153 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 4	298
Figura 154 - Face inferior da aba dos provetes F1 NH após secagem da fase 4	299
Figura 155 - Aspectos da degradação do provete F1 B 6 D após secagem da fase 4	299
Figura 156 - Aspectos da degradação do provete F1 B 17 D após secagem da fase 4	300
Figura 157 - Pormenor do provete F2 B 10 B após secagem da fase 4	300
Figura 158 - Degradação localizada do provete F2 B 11 B após secagem da fase 4	300
Figura 159 - Pormenor da face inferior do canudo dos provetes F2 T2 NH após secagem da fase 4	301
Figura 160 - Provetes F1 B 17 D e F2 T2 NH 10 B após pincelagem a seco da fase 4	306
Figura 161 - Provetes F2 B 10 B e F2 B 11 B após pincelagem a seco da fase 4	307
Figura 162 - Perda de massa nas pincelagens a seco em relação à massa seca	307
Figura 163 - Secagens na câmara durante ensaio composto - todos os provetes	312
Figura 164 - Secagens na câmara durante ensaio composto - provetes mais degradados.	313
Figura 165 - Secagens na câmara durante ensaio composto - provetes menos degradados	314
Figura 166 - Aspectos da degradação de provetes do fabricante 1 no ensaio cíclico e no ensaio composto	320
Figura 167 - Aspectos da degradação de provetes do fabricante 2 no ensaio cíclico e no ensaio composto	321
Figura 168 - Aspectos da degradação de provetes F1 B, F2 B e F2 T2 NH no ensaio composto	322
Figura 169 - Dessalinização de provetes sujeitos a nevoeiro salino	327
Figura 170 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento	333

Figura 171 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento	336
Figura 172 - Absorção de água fria dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento	336
Figura 173 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 2 antes e após envelhecimento (gráfico global).....	337
Figura 174 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes do fabricante 1	341
Figura 175 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2.....	344
Figura 176 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2.....	347
Figura 177 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 1	351
Figura 178 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH.....	354
Figura 179 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2 ..	354
Figura 180 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 2 (gráfico global)	355
Figura 181 - Água absorvida por contacto superficial de esponja por provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento	359
Figura 182 - Água absorvida por contacto superficial de esponja por provetes do fabricante 2 antes e após envelhecimento	359
Figura 183 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1	362
Figura 184 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 2 - grupo 1	366
Figura 185 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 2 - grupo 2.....	366
Figura 186 - Porosimetria de mercúrio de provetes novos e de provetes degradados	369
Figura 187 - Amostras C1	370
Figura 188 - Camadas reduzidas a pó e amostras de controlo	370
Figura 189 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das camadas A, B, C, D e E	371
Figura 190 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das camadas e das amostras de NaCl.....	371
Figura 191 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das amostras de provetes novos ...	371

Figura 192 - Ensaios com tiras colorimétricas sensíveis a cloretos	373
Figura 193 - Ensaios com tiras colorimétricas sensíveis a sulfatos e a nitratos	373

COMPORTAMENTO E DURABILIDADE DE TELHAS CERÂMICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As telhas cerâmicas terão sido inventadas na Antiguidade Grega pelos Coríntios [1], tendo a sua utilização sido difundida pelos Romanos na costa Norte do Mediterrâneo [2]. As coberturas das construções primitivas de Portugal eram revestidas por materiais naturais, como colmo, pedra ou terra [2, 3]. A partir do final da época castreja, e com a conquista romana, os materiais naturais foram sendo sucessivamente substituídos por telhas cerâmicas [2, 3, 4, 5]. O revestimento da cobertura romana era realizado com dois tipos de peças cerâmicas: as *tegulae* e as *imbrice* [2, 3, 5]. As *tegulae* eram telhas planas de formato trapezoidal (do tipo da apresentada na Figura 10) e constituíam os canais de evacuação das águas pluviais [5]. As *imbrice* eram telhas semitroncónicas (com o formato da cobertura circular apresentada na Figura 10) e cobriam as juntas longitudinais entre as *tegulae* [5].

Antes da industrialização as coberturas tradicionais portuguesas eram revestidas com telhas de canudo (Figura 9) de fabrico manual ou artesanal, colocadas por sobreposição simples, formando capa e canal, e fixadas com a ajuda de argamassa [5]. A telha marselha (Figura 7) foi inventada no século XIX em França [4 e 5] e já possui juntas de encaixe.

Com a expansão da industrialização em Portugal durante o século XX os materiais de construção tradicionais locais vão sendo substituídos por materiais industriais [4]. É neste contexto que surgem as telhas lusas ou de aba e canudo (Figura 5), que aliam as vantagens das telhas de encaixe com o aspecto tradicional da cobertura das telhas de canudo [5]. A produção de cerâmica para construção foi sendo concentrada num número cada vez menor de unidades industriais modernas que permitem obter novos produtos com cada vez melhores características.

O revestimento de coberturas com telhas cerâmicas é portanto uma solução tradicional utilizada há séculos. As telhas cerâmicas contribuem de forma importante para o

cumprimento pelas coberturas das exigências funcionais a que estão sujeitas, tais como resistência, estanquidade à água, exigências geométricas e de estabilidade dimensional, isolamento térmico, susceptibilidade às condensações, permeabilidade ao ar, isolamento sonoro, resistência mecânica, comportamento sob a acção do vento, uniformidade de aspecto, reacção ao fogo, durabilidade [2, 5].

O fabrico das telhas cerâmicas evoluiu desde os métodos tradicionais, quase artesanais, até à industrialização, com utilização de tecnologias cada vez mais desenvolvidas [1]. Este processo permitiu a obtenção de telhas cerâmicas com características progressivamente melhoradas, designadamente com maior uniformidade dimensional, melhores características mecânicas, físicas e hídricas e constância de qualidade dentro de cada lote e entre vários lotes.

Além das melhorias do processo de fabrico tem-se assistido a um cada vez maior desenvolvimento da fase de concepção de formatos e geometrias das telhas para melhorar o comportamento face à água das coberturas revestidas com telhas cerâmicas, tendo em conta que este é um revestimento descontínuo.

A maior parte das anomalias detectadas nas coberturas são devidas a deficiente concepção das zonas correntes e deficiente pormenorização e execução dos pontos singulares das coberturas.

A estanquidade à água é uma das principais exigências de desempenho a satisfazer pelas coberturas. No caso de coberturas inclinadas revestidas com telhas cerâmicas, a satisfação desta exigência em zona corrente depende principalmente da impermeabilidade das telhas sob a acção da água e da impermeabilidade da cobertura no seu conjunto face à acção conjunta da chuva e do vento. A impermeabilidade da cobertura depende de um conjunto de parâmetros, incluindo a inclinação das vertentes e o recobrimento das telhas.

A degradação e consequente perda da impermeabilidade das telhas conduzem à perda de estanquidade da cobertura e ao potencial aparecimento de anomalias, não só na estrutura da cobertura mas também noutras partes do edifício. Desempenhando a estanquidade da

cobertura um papel fundamental na prevenção da deterioração e consequente ocorrência de anomalias nos edifícios, é importante o conhecimento dos fenómenos relativos à degradação das telhas cerâmicas, permitindo contribuir, assim, para o fabrico de produtos com uma efectiva e comprovada durabilidade em qualquer tipo de ambiente.

Na generalidade dos países em que a questão da durabilidade das telhas foi alvo de estudos, estes centraram-se apenas na resistência ao gelo, sendo avaliada pelas alterações de aspecto e perda de massa das telhas após serem submetidas a ciclos de gelo-degelo. Na Europa Central a acção do gelo é de facto o principal factor de degradação das telhas.

Em Portugal, no entanto, têm-se verificado casos de degradação acelerada no litoral ocidental e nos Açores, que não são atribuíveis à acção do gelo e devem, portanto, resultar da exposição ao ambiente marítimo que assim se torna o factor condicionante da durabilidade das telhas cerâmicas. O mesmo se passará nas costas marítimas de outros países europeus, no entanto a relevância em termos de percentagens de anomalias não é a mesma de Portugal, dada a concentração populacional no litoral atlântico, onde precisamente o gelo-degelo é de pouca relevância comparativamente aos países mais continentais.

A degradação das telhas em atmosferas marítimas não foi, assim, alvo de qualquer estudo internacional de que haja conhecimento. No entanto, a sua ocorrência tem sido factor de preocupação em Portugal, porque à medida que as várias causas de não-qualidade das telhas nacionais têm sido resolvidas, têm-se evidenciado com mais relevância casos de deterioração acelerada, que põem em causa a possibilidade dos fabricantes nacionais oferecerem garantias alargadas para estes produtos. Os parâmetros de fabrico que condicionam essa degradação acelerada e as características das telhas deles decorrentes não se encontram bem esclarecidos.

As telhas cerâmicas, à semelhança de outros produtos de construção porosos, são susceptíveis à degradação provocada pela cristalização de sais solúveis. No caso das telhas a exposição aos sais solúveis acontece essencialmente quando localizadas em zonas costeiras, onde estão sob a acção dos sais marítimos.

1.2 Objectivos

No contexto descrito, os principais objectivos da Tese são:

- a) O estudo da adequabilidade de ensaios de envelhecimento artificial acelerado para avaliação da durabilidade das telhas em ambiente marítimo;
- b) A identificação das características das telhas mais afectadas por essa exposição;
- c) A identificação dos parâmetros que contribuem significativamente para a degradação das telhas de barro vermelho em ambientes marítimos;
- d) A avaliação comparativa da durabilidade de diversos tipos de telhas.

Com base nos resultados duma campanha experimental incidindo sobre telhas, ou sobre provetes delas extraídos, provenientes de dois grandes fabricantes nacionais, pretende-se procurar relações significativas entre grandezas relevantes que são medidas nos materiais antes e depois da acção dos agentes externos, bem como observar fenómenos físicos que possam explicar as deteriorações registadas.

Pretende-se comparar a deterioração verificada em telhas provenientes de obras e que constituíram casos de fraca durabilidade em ambiente marítimo, com a deterioração resultante de ensaios de envelhecimento acelerado, retirando eventuais dados de valor para a calibração dos métodos experimentais.

1.3 Organização do texto

A Tese encontra-se dividida em sete capítulos. Após este capítulo de introdução, o capítulo dois trata da degradação e durabilidade de materiais de construção porosos, começando pelos aspectos que actualmente são tidos em consideração para a qualificação das telhas cerâmicas, continuando com a apresentação de diversas terminologias usadas para classificar e descrever as formas de alteração e degradação provocadas por alguns agentes

atmosféricos em vários tipos de materiais, passando pelo enquadramento da degradação provocada pelos sais solúveis nos materiais porosos de construção e terminando com a apresentação de casos reais de degradação de telhas cerâmicas provocada por ambiente marítimo.

No capítulo três são apresentados os tipos de telhas cerâmicas, focados alguns aspectos da sua produção e tratada a influência de alguns parâmetros de fabrico nas propriedades das telhas e na sua durabilidade.

No capítulo quatro faz-se uma compilação, análise crítica e selecção de ensaios para caracterização de materiais porosos de construção.

No capítulo cinco apresenta-se o estudo experimental sobre o comportamento de telhas cerâmicas em ambiente marítimo. Este estudo englobou a caracterização de provetes novos, a concepção, desenvolvimento e realização de diversos tipos de ensaios em câmara de nevoeiro e a caracterização de provetes após envelhecimento. Na câmara de nevoeiro foram realizados ensaios de nevoeiro sem sal seguido de secagem, ensaios de nevoeiro com sal seguido de secagem, ensaios cíclicos de nevoeiro/secagem e ensaios compostos constituídos por várias fases cíclicas intercaladas por períodos prolongados de secagem.

No capítulo seis apresentam-se contributos para a melhoria da durabilidade de telhas em ambiente marítimo, tendo em conta os resultados obtidos no estudo experimental.

Finalmente, no capítulo sete apresentam-se as conclusões e os desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2 DEGRADAÇÃO E DURABILIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO POROSOS

2.1 Qualificação e durabilidade das telhas cerâmicas e das coberturas

A qualificação das telhas cerâmicas faz-se em Portugal com base nos requisitos especificados na Norma Europeia aplicável a este tipo de produtos. A versão portuguesa da norma é designada por “NP EN 1304 - Telhas cerâmicas e acessórios. Definições e especificações dos produtos” [6]. A última versão disponível é datada de Julho de 2007, baseada na EN 1304 de Abril de 2005.

No objectivo e campo de aplicação da norma é dito que é aplicável a todas as telhas e acessórios cerâmicos e que estando estes produtos em conformidade com o estabelecido na norma são adequados para revestimento de coberturas inclinadas, de fachadas verticais e de paredes.

Também é dito que a norma define os requisitos mínimos para que um produto, quando satisfatório na data do fornecimento, garanta a capacidade de cumprir a sua função segundo os níveis de desempenho para ele declarados, enquanto sujeito às variações que ocorrem nestes materiais no decurso de condições normais de utilização.

A NP EN 1304 é a versão portuguesa de uma norma europeia harmonizada, tendo sido portanto preparada pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), sob mandato da Comissão Europeia, com vista ao cumprimento das exigências essenciais da Directiva dos Produtos da Construção (DPC) [7]. A parte harmonizada da norma é constituída pelo anexo informativo ZA, onde estão estabelecidas as condições para a marcação CE das telhas e acessórios cerâmicos.

A marcação CE das telhas e acessórios é obrigatória e destina-se a permitir a livre circulação dos produtos no Espaço Económico Europeu [8], distinguindo-se assim das marcas voluntárias, cujo principal objectivo é a valorização e diferenciação dos produtos no mercado.

Os Estados-membros deverão presumir aptos ao uso os produtos de construção colocados no mercado com a marcação CE, pois quando aplicados nas obras, caso estas sejam convenientemente concebidas e realizadas, esses produtos irão permitir que as obras satisfaçam as exigências essenciais estabelecidas na Directiva [8].

O anexo ZA da NP EN 1304 identifica as características essenciais, das telhas e acessórios cerâmicos, que são relevantes para a satisfação das exigências essenciais das obras, estabelecidas na DPC. Também identifica os requisitos relativos a essas características e as cláusulas da norma onde eles são tratados.

Actualmente a durabilidade das telhas cerâmicas é considerada na norma europeia EN 1304:2007 relativamente à resistência ao gelo e é avaliada pelas alterações de aspecto e perda de massa das telhas após serem submetidas a ciclos de gelo-degelo.

A durabilidade das construções é definida como a aptidão dessas construções para satisfazer, ao longo do tempo, as exigências de desempenho estabelecidas, sob as acções previstas [9].

No âmbito da aplicação da Directiva dos Produtos da Construção o conceito de durabilidade é abordado no Documento-Guia F (Durability and the construction products directive) [10]. Este documento tem em conta a Directiva, os documentos interpretativos da Directiva e os mandatos da Comissão, no âmbito dos quais são elaboradas as normas europeias. O guia pretende dar informação útil para a elaboração de especificações técnicas harmonizadas, tais como Normas Europeias harmonizadas ou Aprovações Técnicas Europeias.

No documento-guia a durabilidade de um produto é definida como a aptidão de um produto manter, sob as acções previstas, o seu desempenho ao longo do tempo ou por tempo determinado. O produto, sujeito a manutenção normal, e integrado em obras convenientemente concebidas e realizadas, deve permitir que essas obras satisfaçam as exigências essenciais estabelecidas na DPC durante um período de tempo economicamente razoável (tempo de vida útil do produto).

Tal como na norma europeia, também na norma norte americana ASTM C 1167 - 03 [11] a durabilidade das telhas cerâmicas é considerada apenas relativamente à resistência ao gelo. Nesta norma a durabilidade das telhas é avaliada indirectamente através da sua classificação em níveis de desempenho. Essa classificação é obtida a partir dos valores da absorção de água fria das telhas e do coeficiente de saturação, sendo este calculado dividindo a absorção de água fria pela absorção de água em ebulição. Caso as telhas não cumpram as exigências de absorção de água e do coeficiente de saturação estabelecidas pode-se avaliar a sua durabilidade através do ensaio de 50 ciclos de gelo-degelo.

Para além da acção do gelo, considerada pela normalização aplicável às telhas cerâmicas para efeitos da sua qualificação relativamente à durabilidade, existem outros agentes de degradação das telhas. Estes agentes afectam a durabilidade das telhas e consequentemente o desempenho das coberturas ao longo do tempo.

A acção dos sais solúveis, designadamente do nevoeiro salino, tem sido responsável pela degradação de telhas em coberturas localizadas em algumas regiões costeiras e é objecto deste estudo.

A protecção face à acção da chuva e do vento, e às suas consequências como as infiltrações e o levantamento das telhas, é a principal função das coberturas. Esta protecção é conferida pela impermeabilidade das telhas e pela estanquidade das coberturas. A estanquidade das coberturas depende da inclinação das vertentes, do encaixe e sobreposição das telhas, da fixação das telhas e da pormenorização eficiente das zonas singulares das coberturas.

A ocorrência de condensações promove a humedificação das telhas e dos restantes elementos das coberturas e pode ser evitada através da ventilação eficiente dos telhados.

A acção dos agentes biológicos provoca a acumulação de musgos, folhas e detritos sobre a cobertura, o que pode levar à degradação das telhas ou ao entupimento dos sistemas de drenagem das águas pluviais. É necessário visitar a cobertura e realizar trabalhos de manutenção.

Acções mecânicas fortuitas, como a queda de objectos ou circulação indevida sobre a cobertura, podem sujeitar as telhas a cargas concentradas que vençam a sua resistência à flexão, provocando a fractura das telhas. Também neste caso será necessário visitar a cobertura para detectar e substituir as telhas partidas.

As telhas cerâmicas que não contenham materiais orgânicos são classificadas na classe A1 de reacção ao fogo [6]. O mesmo acontece para as telhas que contenham materiais orgânicos numa percentagem igual ou inferior a 0,1 % da sua massa ou volume. Nos restantes casos, e quando tal for exigido pelos regulamentos aplicáveis, será necessário realizar ensaios para classificar as telhas relativamente à sua reacção ao fogo.

As telhas cerâmicas resistem a agentes de poluição atmosférica, como as chuvas ácidas, que originam corrosão química [2].

Para realizar a manutenção das coberturas e permitir o acesso a equipamentos instalados nas coberturas é necessário criar as condições para as tornar visitáveis, podendo ser colocadas telhas de passareira e ventilação.

O manual de aplicação de telhas cerâmicas [2] propõe periodicidade semestral e anual para as actividades de manutenção indicadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Periodicidade das operações de manutenção [2]

Acções	Periodicidade	
	Semestral	Anual
Inspecção geral dos elementos da cobertura		X
Desobstrução dos pontos de ventilação	X	
Eliminação de verdete, vegetação e detritos em geral		X
Inspecção e manutenção do sistema de drenagem	X	
Inspecção e manutenção dos remates das coberturas		X
Verificação das fixações		X

Um guia francês de manutenção de edifícios [12] preconiza as seguintes operações de manutenção de coberturas de telhas:

- Inspeções periódicas anuais ou após fenómeno meteorológico excepcional para inspecção geral dos elementos da cobertura, verificar o correcto posicionamento das telhas e a necessidade de substituir telhas partidas.
- Manutenção preventiva anual para limpeza da cobertura, eliminação de vegetação, desobstruir o sistema de drenagem e reposicionar telhas deslocadas.
- Manutenção ligeira, com periodicidade de 7 anos, para corrigir deteriorações susceptíveis de comprometer a estanquidade da cobertura, incidindo sobre os pontos singulares da cobertura, como juntas e intercepções, e substituição de telhas partidas.
- Manutenção pesada, com periodicidade de 15 anos, para substituição das telhas degradadas e reforço das fixações. Verificação e reparação dos diversos elementos da cobertura.
- Substituição completa do revestimento da cobertura após o tempo de vida útil previsto de 50 anos.

Foram abordadas a qualificação e a durabilidade das telhas cerâmicas no âmbito da marcação CE e da normalização europeia, os agentes de degradação das telhas e das coberturas e a manutenção das coberturas necessária ao seu bom desempenho durante a vida útil expectável.

2.2 Terminologia de formas de alteração e degradação

Os diferentes agentes de degradação referidos provocam formas de alteração diversificadas, cuja terminologia não está uniformizada.


A terminologia de alteração e degradação de materiais porosos é definida em diversos documentos respeitantes a vários tipos de materiais. Do Quadro 2 ao Quadro 6 faz-se uma compilação dessa terminologia, proveniente de várias fontes.

No Quadro 2 pode-se ver uma terminologia, com origem numa publicação do LNEC [13], de algumas formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares provocadas pela exposição natural dos materiais. São apresentados os termos em Português e Inglês, a definição em Português e uma figura representativa da degradação. Segundo o que é referido no documento as definições referem-se apenas ao que pode ser observado visualmente, sem ter em conta as respectivas causas nem a interpretação do processo que originou a sua formação.





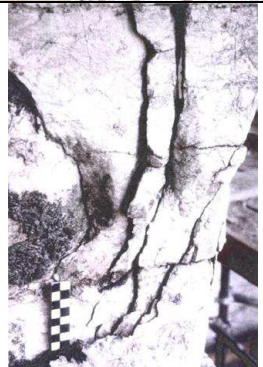
No Quadro 3 e no Quadro 4 apresentam-se as definições dos defeitos considerados na normalização europeia aplicável a telhas cerâmicas [6, 14], englobando os defeitos detectáveis em telhas novas e os defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo. Também se apresenta no Quadro 5 a terminologia dos defeitos considerados numa norma francesa [15] já anulada e relativa ao ensaio de gelo-degelo.

Finalmente é apresentada no Quadro 6 uma compilação e comparação da terminologia considerada no documento de LNEC relativo aos materiais pétreos e similares, na norma europeia com exigências aplicáveis às telhas cerâmicas e na norma europeia relativa ao ensaio de gelo-degelo das telhas.

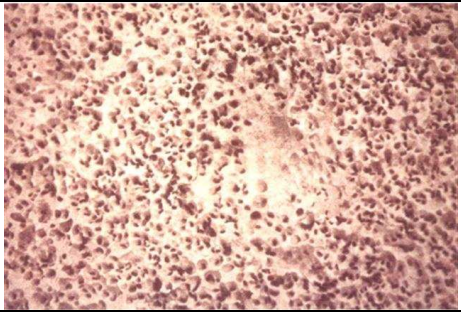


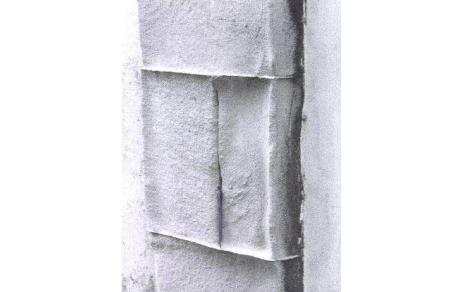
Quadro 2 - Materiais pétreos e similares. Terminologia das formas de alteração e degradação. LNEC, ITPRC 2 [13]

Português	Inglês	Figura
Bolha - Elevação superficial e localizada do material, assumindo formas e consistências variáveis.	Blister	
Desagregação granular - Perda de coesão que se traduz pelo fácil destaque de partículas de dimensão da areia mesmo com esforços mecânicos de fraca intensidade.	Granular disaggregation	
Eflorescência - Formação de agregados cristalinos superficiais, geralmente de fraca coesão e cor clara. Criptoflorescência se a formação ocorrer abaixo da superfície, provocando bolhas ou destaques .	Efflorescence	
Empolamento - Existência de camada superficial não aderente ao substrato; em geral antecede a queda do material. O termo é usado em particular para superfícies de reboco ou azulejo. Por vezes é também utilizada a designação destaque .	Bowing	
Escamação ou descamação - Destaque total ou parcial de escamas (fragmentos achatados com extensão reduzida e espessura inferior a 0,5 cm).	Peeling	

Quadro 2 - Materiais pétreos e similares. Terminologia das formas de alteração e degradação. LNEC, ITPRC 2 [13] (cont.)



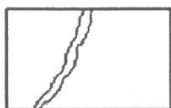
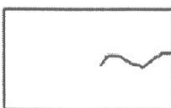
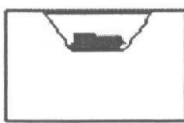

Português	Inglês	Figura
Esfoliação - Divisão múltipla em lâminas finas paralelas entre si.	Exfoliation	
Fissura - Caso particular de fractura em que pelo menos uma das extremidades não atinja o contorno do objecto em questão.	Fissure	
Fractura - Superfície de rotura que divide o objecto em partes distintas, podendo implicar o afastamento recíproco das partes fracturadas.	Fracture	
Lacuna - Ausência de material resultante de queda ou perda.	Lacunae	
Lascagem - Destaque de fragmentos de extensão lateral reduzida e espessura centimétrica, subparalelos à superfície.	Spalling	

Quadro 2 - Materiais pétreos e similares. Terminologia das formas de alteração e degradação. LNEC, ITPRC 2 [13] (cont.)

Português	Inglês	Figura
Picadura ou Picamento - Degradação que se manifesta através da formação de cavidades tendencialmente esféricas ou cilíndricas com dimensões milimétricas.	Pitting	
Placa - Destaque de fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura superior a 0,5 cm.	Plaque	
Plaqueta - Destaque de fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura inferior a 0,5 cm.	Plaquette	
Pulverização - Perda de coesão da superfície que conduz ao desprendimento de material sob a forma de pó ou grânulos.	Pulverization	


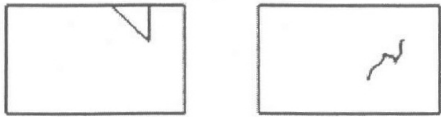
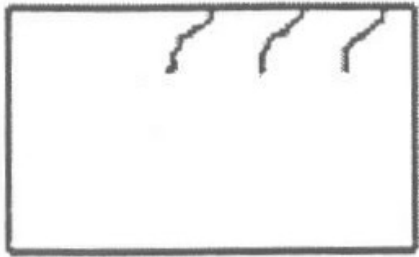
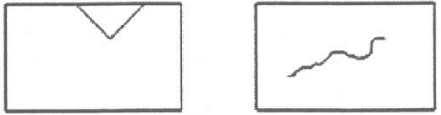
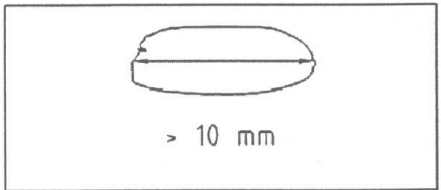

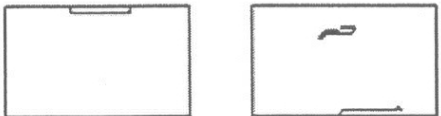

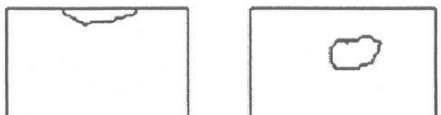
A transição de *placa* para *plaqueta* corresponde a uma diminuição de espessura; para *lasca* ao decréscimo da extensão lateral; para *escama* ao decréscimo simultâneo das duas [13]. Em termos genéricos, num elemento poderá existir um número reduzido de *placas* e em quantidades sucessivamente crescentes poderão ocorrer as *plaquetas*, as *lascas* e as *escamas* [13]. O conceito de **extensão lateral** deve ser considerado por comparação com a dimensão do elemento onde ocorre a forma de alteração [13].

Quadro 3 - Defeitos em telhas cerâmicas. NP EN 1304 [6]




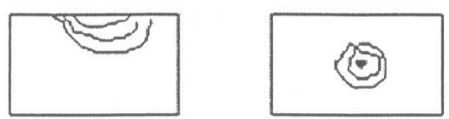
Português	Inglês	Esquema, se apresentado na NP EN 539-2 [14]
Eflorescências - Depósito cristalino de sais solúveis sobre a superfície das telhas ou acessórios, resultando da migração da água desde o interior e sua evaporação na superfície das telhas ou acessórios.	Efflorescence	—
Fissura - Fenda com um traçado mais ou menos regular mas que não afecta toda a espessura do produto.	Crack	—
Fendilhagem (engobe ou vidrado) - Fissuras que apenas afectam a espessura do engobe ou do vidrado ou da superfície vitrificada de um produto obtido por redução intensa e que não comprometem a aderência do engobe ou do vidrado ao corpo cerâmico.	Crazing (glaze or engobe)	—
Defeitos de estrutura		
Fractura - Defeito de estrutura consistindo numa separação do produto em dois ou mais fragmentos.	Break	 
Fenda estrutural - Defeito de estrutura consistindo numa racha com um traçado mais ou menos regular, afectando toda a espessura do produto, visível a olho nu.	Structural crack	 
Perda de perne - Defeito de estrutura consistindo na perda completa do perne num produto concebido só com um perne de fixação.	Loss of nib	—
Defeitos de superfície		
Bolha - Defeito de superfície de dimensão média superior a 10 mm, consistindo num levantamento superficial e localizado de material, ocorrido durante a fabricação.	Blistering	—
Cratera - Defeito de superfície de dimensão média superior a 7 mm, consistindo na separação de material na parte visível do produto. Isto é quase sempre devido à expansão de um grão de, por exemplo, cal ou pirites.	Pit	 
Lascado - Defeito de superfície de dimensão média superior a 7 mm, consistindo numa fracção de material, separada do corpo cerâmico, na parte visível do produto.	Chip	—

Segundo a norma NP EN 1304 as fendas que não comprometam as características físicas e mecânicas das telhas não são defeito. As telhas não devem apresentar defeitos de estrutura.


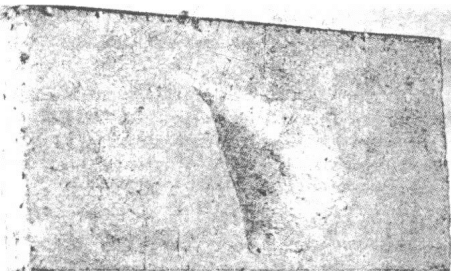
Quadro 4 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo.
NP EN 539-2 [14]

Português	Inglês	Esquema
Cratera - vd. EN 1304. Defeito de superfície de dimensão média superior a 7 mm, consistindo na separação de material na parte visível do produto. Isto é quase sempre devido à expansão de um grão de, por exemplo, cal ou pirites.	Pit	
Microfissura - Fenda superficial de largura menor ou igual a 0,20 mm.	Hair crack	
Início de fissura - Fissura em formação nos bordos, penetrando ligeiramente no corpo cerâmico.	Nascent crack	
Fissura superficial - Fenda de largura maior que 0,20 mm e com um comprimento superior a 30 mm, que não atravessa a espessura do produto.	Surface crack	
Defeito superficial - Perda de parte do corpo cerâmico da superfície do produto, sendo uma das dimensões dessa parte maior que 10 mm. A área da superfície do produto permanece inalterada.	Surface damage	
Escamado - Levantamento superficial, começo de lascagem ou fissura, que origina uma alteração.	Scaling	
Lascado - Perda de parte do corpo cerâmico da superfície do produto.	Chip	
Descasque - Perda de uma parte da camada superficial do produto.	Peeling	
Esfoliação - Perda progressiva de material atingindo toda ou parte da espessura do produto.	Flaking	


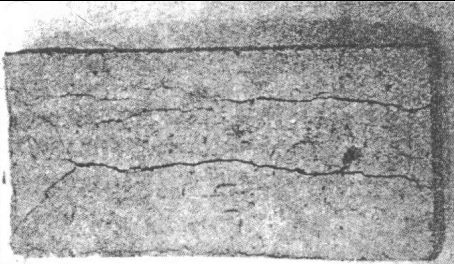
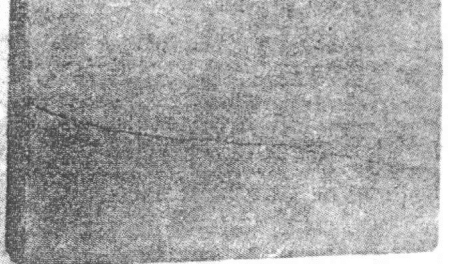
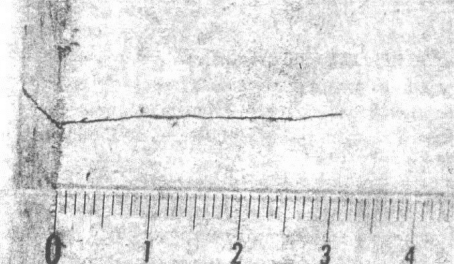
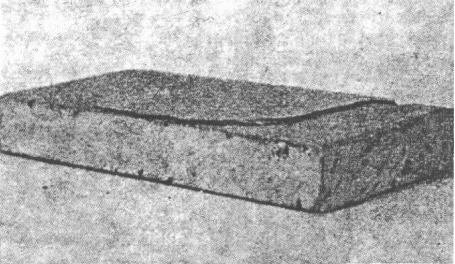
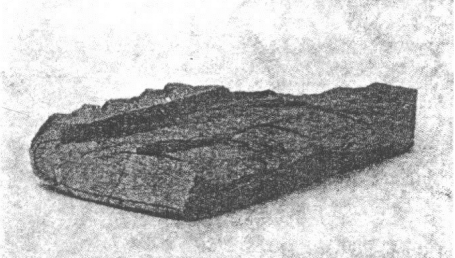
Quadro 4 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo.
NP EN 539-2 [14] (cont.)

Português	Inglês	Esquema
Fenda estrutural - vd. EN 1304. Defeito de estrutura consistindo numa racha com um traçado mais ou menos regular, afectando toda a espessura do produto, visível a olho nu.	Structural crack	
Perda de nervuras - Perda de material atingindo os relevos de encaixe e de reforço de forma a influenciar a sua função.	Loss of ribs	
Fractura - vd. EN 1304. Defeito de estrutura consistindo numa separação do produto em dois ou mais fragmentos.	Break	
Folheado - Esfoliação lamelar que pode conduzir a uma desagregação do corpo cerâmico numa sucessão de planos paralelos.	Delamination	

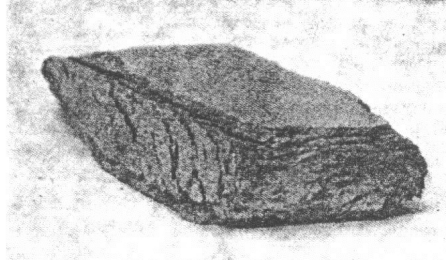
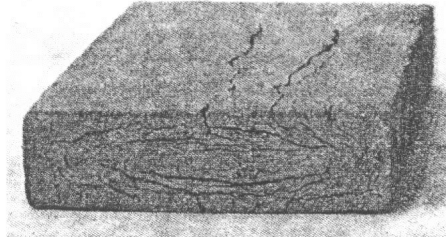
Quadro 5 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo.
NF P 31-301 [15]

Francês	Português	Imagem
a) cratère : voir article 1.5.13.1.1 (ne pas confondre avec l'éclat défini en b). [1.5.13.1 Défauts superficiels 1.5.13.1.1 Cratère Départ de matière souvent dû à l'expansion d'un grain de chaux ou de pyrite. La dimension du cratère est définie par son diamètre moyen, qui est égal à la moyenne arithmétique entre la plus grande et la plus petite dimension de ce cratère.]	Cratera	
b) éclat : voir article 1.5.13.1.5. [1.5.13.1 Défauts superficiels 1.5.13.1.5 Éclat Fraction de matière détachée du tesson ² ; l'éclat laisse une brisure nette. Il est couramment dénommé : - « épaufrure » lorsqu'il affecte soit des nervures d'assemblage, soit tout autre relief de la tuile. Dans ce cas, il s'agit généralement d'un défaut linéaire, - « écornure » lorsqu'il affecte un des angles de la tuile.]	Lasca- gem (segundo ITPRC 2) Lascado (segundo EN 1304)	
NOTE 2: Le mot tesson désigne le matériau constitutif du produit cuit.		




Quadro 5 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo.
NF P 31-301 [15] (cont.)

Francês	Português	Imagem
c) cassure : voir article 1.5.13.2.2. [1.5.13.2 Défauts de structure 1.5.13.2.2 Cassure Séparation de la tuile en deux ou plusieurs fragments.]	Fractura	
d) fissure : fente ouverte intéressant ou non toute l'épaisseur du produit.	Fissura	
e) microfissure : fente très fine, de dimensions difficilement mesurables.	Microfissura	
f) amorce de fissure : fente traversante ou non ne dépassant pas 40 mm de longueur.	Início de fissura	
g) écaillage : soulèvement superficiel de matière sous forme de plaques restant solidaires du tessin.	Escama- do	
h) exfoliation : fraction de matière détachée du tessin sous forme de plaque.	Esfolia- ção	

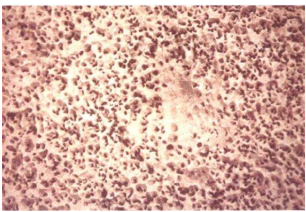
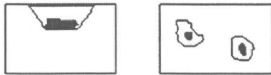

Quadro 5 - Defeitos em telhas cerâmicas decorrentes do ensaio de gelo-degelo.
NF P 31-301 [15] (cont.)

Francês	Portu- guês	Imagem
i) effritement : départ de matière sous forme pulvérulente.		
j) feuilletage : altération par gonflement de couches superposées, visible sur la tranche de la tuile.		
k) désagrégation : dislocation du tessou dans sa masse. La désagrégation peut constituer l'aboutissement de certaines des altérations définies précédemment.		—
l) désolidarisation d'un tenon : rupture du tenon à sa section de jonction avec la tuile.	Perda de perne	—


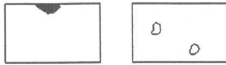

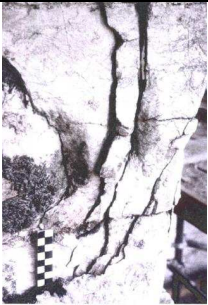

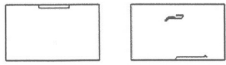
Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14])

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Eflorescência - Formação de agregados cristalinos superficiais, geralmente de fraca coesão e cor clara. Criptoflorescência se a formação ocorrer abaixo da superfície, provocando bolhas ou destaques .	Efflorescence		NP EN 1304:2007	Eflorescências - Depósito cristalino de sais solúveis sobre a superfície das telhas ou acessórios, resultando da migração da água desde o interior e sua evaporação na superfície das telhas ou acessórios.	Efflorescence	—	
Bolha - Elevação superficial e localizada do material, assumindo formas e consistências variáveis.	Blister		NP EN 1304:2007	Defeitos de superfície Bolha - Defeito de superfície de dimensão média superior a 10 mm, consistindo num levantamento superficial e localizado de material, ocorrido durante a fabricação.	Blistering	—	A bolha considerada no itprc2 é uma alteração decorrente do uso enquanto na EN tem origem no fabrico.
Empolamento - Existência de camada superficial não aderente ao substrato; em geral antecede a queda do material. O termo é usado em particular para superfícies de reboco ou azulejo. Por vezes é também utilizada a designação destaque .	Bowing						


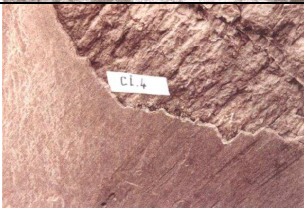



Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Picadura ou Picamento - Degradação que se manifesta através da formação de cavidades tendencialmente esféricas ou cilíndricas com dimensões milimétricas.	Pitting						
			NP EN 1304:2007 NP EN 539-2:2007	Cratera - Defeito de superfície de dimensão média superior a 7 mm, consistindo na separação de material na parte visível do produto. Isto é quase sempre devida à expansão de um grão de , por exemplo, cal ou pirites .	Pit		
Desagregação granular - Perda de coesão que se traduz pelo fácil destaque de partículas de dimensão da areia mesmo com esforços mecânicos de fraca intensidade.	Granular disaggregation						




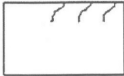
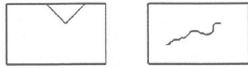
Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Escamação ou descamação - Destaque total ou parcial de escamas (fragmentos achatados com extensão reduzida e espessura inferior a 0,5 cm).	Peeling		NP EN 539-2:2007	Defeito superficial Descasque - Perda de uma parte da camada superficial do produto.	Peeling		Não é clara a diferença entre o descasque e o lascado na norma EN 539-2. O esquema aparenta maiores profundidade da degradação e perda de material no descasque e menores no lascado .
			NP EN 539-2:2007	Defeito superficial Escamado - Levantamento superficial, começo de lascagem ou fissura, que origina uma alteração.	Scaling		
Lascagem - Destaque de fragmentos de extensão lateral reduzida e espessura centimétrica , subparalelos à superfície.	Spalling		NP EN 1304:2007	Defeitos de superfície Lascado - Defeito de superfície de dimensão média superior a 7 mm, consistindo numa fracção de material, separada do corpo cerâmico, na parte visível do produto.	Chip		O lascado do itprc2 tem espessura centimétrica o que não acontece no lascado das EN . As extensões laterais também não parecem equivalentes.
			NP EN 539-2:2007	Defeito superficial Lascado - Perda de parte do corpo cerâmico da superfície do produto.	Chip		Não é clara a diferença entre o lascado e o descasque na norma EN 539-2.


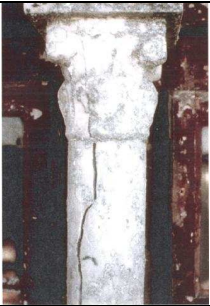



Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Plaqueta - Destaque de fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura inferior a 0,5 cm.	Plquette						
Placa - Destaque de fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura superior a 0,5 cm.	Plaque						
Esfoliação - Divisão múltipla em lâminas finas paralelas entre si.	Exfoliation		NP EN 539-2:2007	Defeito superficial Esfoliação – Perda progressiva de material atingindo toda ou parte da espessura do produto.	Flaking		
			NP EN 539-2:2007	Folheado – Esfoliação lamelar que pode conduzir a uma desagregação do corpo cerâmico numa sucessão de planos paralelos.	Delamination		

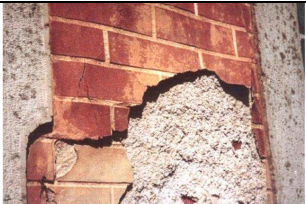
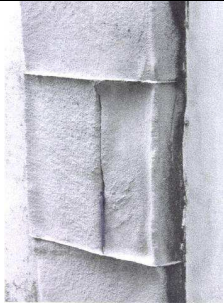
Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Fissura – Caso particular de fractura em que pelo menos uma das extremidades não atinja o contorno do objecto em questão.	Fissure		NP EN 1304:2007	Fissura – Fenda com um traçado mais ou menos regular mas que não afecta toda a espessura do produto.	Crack		
			NP EN 539-2:2007	Microfissura – Fenda superficial de largura menor ou igual a 0,20 mm.	Hair crack		
			NP EN 539-2:2007	Início de fissura – Fissura em formação nos bordos, penetrando ligeiramente no corpo cerâmico.	Nascent crack		
			NP EN 539-2:2007	Fissura superficial – Fenda de largura maior que 0,20 mm e com um comprimento superior a 30 mm, que não atravessa a espessura do produto.	Surface crack		

Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
			NP EN 1304:2007 NP EN 539-2:2007	Defeitos de estrutura Fenda estrutural - Defeito de estrutura consistindo numa racha com um traçado mais ou menos regular, afectando toda a espessura do produto, visível a olho nu.	Struc-tural crack		
Fractura - Superfície de rotura que divide o objecto em partes distintas, podendo implicar o afastamento recíproco das partes fracturadas.	Fracture		NP EN 1304:2007 NP EN 539-2:2007	Defeitos de estrutura Fractura - Defeito de estrutura consistindo numa separação do produto em dois ou mais fragmentos.	Break		
			NP EN 1304:2007 NP EN 539-2:2007	Defeitos de estrutura Perda dos pernes - Defeito de estrutura consistindo na perda de todos os pernes de fixação.	Loss of nibs		
			NP EN 539-2:2007	Perda de nervuras - Perda de material atingindo os relevos de encaixe e de reforço de forma a influenciar a sua função.	Loss of ribs		

Quadro 6 - Compilação e comparação da terminologia das formas de alteração e degradação de materiais pétreos e similares (ITPRC 2 [13]), dos defeitos definidos na norma europeia de telhas cerâmicas NP EN 1304 [6] e dos defeitos decorrentes do ensaio de gelo-degelo de telhas (NP EN 539-2 [14]) (cont.)

ITPRC 2			Normas europeias				Observações
Português	Inglês	Figura	Norma	Português	Inglês	Esquema	
Lacuna - Ausência de material resultante de queda ou perda.	Lacunae						
Pulverização - Perda de coesão da superfície que conduz ao desprendimento de material sob a forma de pó ou grânulos.	Pulverization						

Tendo em conta a informação compilada no Quadro 2 ao Quadro 6 e a degradação observada em telhas cerâmicas sujeitas aos ensaios acelerados de nevoeiro salino realizados neste trabalho e em telhas sujeitas a exposição natural em ambiente marítimo, apresentam-se no Quadro 7 propostas para a designação dos tipos de degradação provocados por nevoeiro salino.

Quadro 7 - Tipos de degradação provocados em telhas cerâmicas sujeitas a ensaios de nevoeiro salino e a exposição natural a atmosferas marítimas

Eflorescência - Formação de agregados cristalinos de sais solúveis sobre a superfície das telhas, resultando da migração da água desde o interior e sua evaporação na superfície. Criptoflorescência - Se a formação ocorrer abaixo da superfície, provocando bolhas ou empolamentos.
Picamento - Degradação que se manifesta através da formação de cavidades tendencialmente esféricas ou cilíndricas com dimensões milimétricas.
Desagregação granular - Perda de coesão que se traduz pelo destaque de partículas de dimensão da areia.
Escamação - Destaque total ou parcial de escamas (fragmentos achatados com extensão e espessura reduzidas).
Plaquetas - fragmentos achatados paralelos à superfície, com grande extensão lateral e espessura reduzida.
Lascagem – destaque de fragmentos de extensão lateral reduzida e espessura superior à das escamas.
Empolamento – Elevação superficial devida ao início do destaque de uma camada superficial do material e que em geral antecede a queda do material.
Fissura – Fenda com um traçado mais ou menos regular que não afecta toda a espessura do produto.
Folheado – Esfoliação lamelar que pode conduzir a uma desagregação do corpo cerâmico numa sucessão de planos paralelos.
Fractura - Defeito de estrutura consistindo numa separação do produto em dois ou mais fragmentos.

2.3 A degradação dos materiais de construção porosos provocada por sais solúveis

2.3.1 Introdução

A cristalização de sais solúveis é considerada uma das principais causas da degradação de materiais de construção porosos [16].

O guia CIB/RILEM relativo à previsão do tempo de vida útil de materiais e componentes de construção [17] identifica os sais como uma das classes de agentes ambientais de natureza química que causam degradação. Esta classificação é baseada na natureza dos agentes que causam degradação. Os agentes químicos podem ter efeitos de natureza química ou de natureza mecânica sobre os materiais e componentes de construção.

A caracterização dos factores de natureza ambiental responsáveis pela degradação dos materiais de construção deve ter em conta os mecanismos de degradação que se desenvolvem nos diversos tipos de materiais afectados.

Os sais solúveis presentes nas construções podem ser provenientes dos próprios materiais de construção, podem ser sais atmosféricos depositados nas superfícies das construções ou podem ser sais provenientes do solo e transportados em solução através dos componentes dos edifícios devido à capilaridade dos materiais de construção.

O mar é a maior fonte de sais [17]. O principal sal marítimo é o cloreto de sódio [18]. No Quadro 8 apresentam-se as concentrações de sete substâncias que no seu conjunto constituem 99 % dos constituintes dissolvidos na água do mar [19].

O efeito do ambiente marítimo na durabilidade dos materiais de construção é um dos factores de degradação ambiental mais estudados [17]. O nevoeiro salino pode ser arrastado pelo vento desde as zonas costeiras para zonas afastadas da costa, no entanto a concentração de sais na atmosfera diminui rapidamente com a distância à costa [17].

Quadro 8 - Composição da água do mar [19]

Iões	g/kg de água do mar
Cloreto (Cl^-)	19,35
Sódio (Na^+)	10,76
Sulfato (SO_4^{2-})	2,71
Magnésio (Mg^{2+})	1,29
Cálcio (Ca^{2+})	0,41
Potássio (K^+)	0,39
Bicarbonato (HCO_3^-)	0,14

Para além do nevoeiro salino também as chuvas promovem a deposição de cloretos em zonas costeiras, podendo a deposição atingir 10 g/m^2 a 20 g/m^2 por ano nas costas da Europa ocidental [18].

O guia CIB/RILEM refere que um efeito importante da presença de sais nos materiais de construção se deve à sua higroscopicidade, o que aumenta o teor de humidade dos materiais e prolonga os períodos em que estes se encontram humedecidos.

Relativamente às formas e mecanismos de degradação provocados pelos sais nas pedras naturais, o guia CIB/RILEM [17] refere que a cristalização de sais solúveis pode provocar tensões que levam à degradação das pedras. A cristalização perto da superfície pode levar à lascagem e consequente queda de material expondo assim uma nova superfície à acção dos agentes de degradação.

Também no caso dos materiais cerâmicos cozidos o guia CIB/RILEM [17] refere a possibilidade da degradação da superfície de tijolos, sob a forma de lascagem, provocada pela cristalização de sais solúveis. Este mecanismo de degradação parece ser extrapolável para a generalidade dos materiais porosos.

Para acontecer a degradação de um material que seja susceptível de ser degradado por acção dos sais solúveis é necessária a conjugação de diversos factores como a presença de sais, a existência de humidade e a ocorrência das condições ambientais propícias [18].

2.3.2 Propriedades dos sais

Um sal é um composto iónico formado por um catião (excepto o H^+) e um anião (excepto OH^- ou O^{2-}) [19]. A reacção entre um ácido e uma base, designada reacção ácido-base ou reacção de neutralização, dá origem a um sal e água. Os tipos de sais comuns são: cloretos, sulfatos, nitratos e carbonatos [18].

A higroscopicidade e a solubilidade dos sais são propriedades que potenciam a sua acção como agentes de degradação dos materiais porosos de construção [18].

Por serem solúveis em água os sais podem ser transportados em solução. Os sais dissolvidos podem voltar a cristalizar e é possível ocorrerem ciclos de dissolução-cristalização, que podem degradar os materiais porosos.

A solubilidade é a quantidade máxima de soluto que pode ser dissolvida numa certa quantidade de solvente a uma dada temperatura [19]. Ao contrário do que acontece com outros sais, a solubilidade do NaCl é pouco influenciada pela temperatura. A solubilidade do cloreto de sódio em água é 34,2 g / 100 g de água à temperatura de 0 °C e 38 g / 100 g de água à temperatura de 60 °C [19].

A cristalização é o processo em que um soluto dissolvido se retira da solução para formar cristais [19]. Para que a cristalização aconteça é necessário que a solução esteja sobressaturada, ou seja, tem que conter uma quantidade de soluto superior à sua solubilidade, que depende da quantidade de solvente presente na solução e da temperatura da solução.

Nos sais cuja solubilidade depende da temperatura é possível obter soluções saturadas ou sobressaturadas baixando lentamente a temperatura de soluções em que os sais se

encontram totalmente dissolvidos. Este é o caso, por exemplo, dos sulfatos de sódio e de magnésio, do carbonato de sódio e do nitrato de sódio.

Nos sais cuja solubilidade depende pouco da temperatura, como é o caso do cloreto de sódio, a concentração nas soluções só pode aumentar através da evaporação do solvente.

Os sais são higroscópicos, ou seja absorvem o vapor de água do ar que os rodeia. Devido à higroscopicidade, a presença de sais aumenta o teor de humidade dos materiais porosos de construção, facilitando assim a dissolução dos sais. Em alguns casos a higroscopicidade pode promover a formação de formas hidratadas dos sais a partir da forma anidra ou desidratada [18]. A higroscopicidade de um sal pode ser tão elevada que o sal é deliquescente, sendo capaz de se dissolver no vapor de água que absorve da atmosfera, formando-se uma solução.

A deliquescência de um sal acontece quando a sua pressão de vapor de água é menor ou igual à pressão de vapor de água da atmosfera. Nestas condições o sal absorve o vapor de água da atmosfera e forma-se uma solução.

Quando a pressão de vapor da solução salina saturada iguala a pressão de vapor da atmosfera saturada, o equilíbrio é atingido e cessa a absorção pela solução salina do vapor de água da atmosfera.

Nesta situação de equilíbrio existe uma relação entre a pressão de vapor da solução saturada do sal (P_{sal}) e a pressão de vapor de água da atmosfera saturada (P_s), que permite obter a humidade relativa de equilíbrio da solução saturada do sal (H_{Req}):

$$H_{Req} [\%] = (P_{sal} / P_s) \times 100$$

A pressão de vapor de água de um sal é constante a uma certa temperatura, variando com a temperatura. Portanto para uma dada temperatura a deliquescência só acontece se a humidade relativa da atmosfera for superior à humidade relativa de equilíbrio da solução saturada do sal.

A humidade relativa de equilíbrio do cloreto de sódio varia pouco com a temperatura, como se observa no Quadro 9, baseado no trabalho de Arnold e Zehnder [20] citado por Goudie [18].

Quadro 9 - Humidade relativa de equilíbrio do Cloreto de Sódio

Temperatura	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
HReq [%]	75,5	75,7	75,7	75,6	75,5	75,3	75,1

Ensaio realizados nos Países Baixos mostraram que um tijolo contaminado com 4 % de NaCl pode absorver quase 10 % de humidade da atmosfera num ambiente de 80 % de humidade relativa [18].

Em geral os sulfatos e os carbonatos são menos solúveis e menos higroscópicos. Os cloretos e os nitratos são muito solúveis e muito higroscópicos [21 e 18].

Quando a água da solução salina evapora, a concentração de sal aumenta e os sais acabam por cristalizar. Quando a cristalização dos sais acontece à superfície dos materiais formam-se as eflorescências, quando a cristalização ocorre no interior dos materiais formam-se as criptoflorescências [21].

2.3.3 Fontes de humidade e condições ambientais

As principais fontes de humidade, necessária à ocorrência de degradação provocada por sais solúveis, são: o orvalho, o nevoeiro, a chuva e a água do solo [18]. Outras fontes de humidade são a humidade de construção, a humidade devida a fenómenos de higroscopicidade e a humidade de condensações para além do já referido orvalho [21].

A presença de humidade é essencial nos processos de dissolução-cristalização e nas reacções químicas que ocorrem nos processos de degradação. A humidade também pode ser uma fonte de sais, como no caso do nevoeiro salino. Para além disso a humidade pode também transportar os sais dissolvidos, como é o caso da água do solo. A humidade pode

transferir os sais de locais onde são inofensivos e depositá-los em materiais susceptíveis de ser degradados e onde possam existir as condições necessárias à ocorrência das degradações.

Outras das condições ambientais que promovem a degradação, para além dos ambientes com sais e humidade suficientes, são a existência de variações cíclicas de temperatura e humidade, a existência de condições que permitam uma rápida evaporação da humidade e promovam assim a cristalização dos sais, os locais com elevado nível freático e a existência de ventos predominantes que transportem sais [18].

2.3.4 Susceptibilidade dos materiais

A susceptibilidade dos materiais porosos de construção à degradação devida a sais solúveis está relacionada com diversas propriedades físicas e químicas dos materiais [18]. As características hídricas, como a absorção de água e a porosidade, são muito importantes em todos os materiais porosos. Também as diversas propriedades dos constituintes dos materiais, como a granulometria dos agregados e o tipo de aglomerante das argamassas, influenciam na susceptibilidade à degradação provocada por sais solúveis. Outras características importantes são a composição mineralógica e química dos materiais pétreos presentes.

A maior ou menor facilidade de entrada, circulação e permanência da água dentro do material poroso depende das suas características hídricas [18]. As características hídricas podem ser quantificadas através da determinação de várias propriedades como os diversos tipos de absorção de água (absorção de água fria à pressão atmosférica, absorção de água fria sob vácuo, absorção de água em ebulição, por exemplo), e as diversas propriedades ligadas à porosidade e porosimetria (como a porosidade aberta e a distribuição de dimensões de poros).

A porosidade e a porosimetria influenciam de duas maneiras a degradação provocada por sais. Por um lado afectam o fluxo da humidade no material, a sua entrada e saída devido

aos fenómenos de capilaridade e de evaporação de água. Por outro influenciam na localização da ocorrência de cristalização [18].

Outro factor que pode aumentar a susceptibilidade de um material à degradação provocada por sais solúveis é a existência de descontinuidades como fendas ou fissuras. Apesar da sua constituição genericamente contínua, os materiais cerâmicos cozidos também apresentam descontinuidades de material na forma de dobras ou vincos em algumas arestas ou nas zonas correspondentes às juntas dos moldes. A solução salina pode acumular-se nestas descontinuidades, e, devido à secagem, a evaporação da solução promove a cristalização dos sais solúveis, podendo ocorrer ciclos de dissolução-cristalização ou mesmo ciclos de dissolução-cristalização-hidratação, nos casos em que há tendência para a formação de sais hidratados (o que não é o caso do NaCl). Estes fenómenos vão aumentando a dimensão das fissuras, e a degradação pode levar à queda de material.

2.3.5 Simulações experimentais de cristalização e dissolução de sais

Numa compilação de 1997 [18] dos estudos experimentais que tentaram simular em laboratório os efeitos de cristalização, dissolução e hidratação de sais solúveis em materiais porosos, são referidos os seguintes aspectos:

- Grande variedade de procedimentos de ensaio, de materiais ensaiados, de condições ambientais simuladas e de formas de descrição da degradação sofrida pelos materiais ensaiados.
- Na maior parte dos ensaios foram utilizadas soluções com um único sal e em alguns utilizaram-se combinações de vários sais.
- Na maior parte dos ensaios foram utilizadas soluções salinas saturadas e em alguns utilizaram-se soluções mais diluídas.
- A impregnação com as soluções salinas foi realizada através de imersão total ou parcial dos provetes, não tendo sido utilizados outros métodos de impregnação. No decorrer dos ensaios as imersões foram contínuas ou cíclicas.
- Sais diferentes induziram diferente degradação em materiais pétreos iguais.

- Materiais pétreos diferentes apresentaram respostas diferentes ao ataque provocado pelas mesmas soluções salinas.
- Em ensaios onde provetes iguais foram sujeitos a seis ciclos climáticos diferentes, após imersão em soluções saturadas de diversos sais, verificou-se que os ciclos climáticos influenciaram os resultados obtidos. Para provetes do mesmo tipo e usando a mesma solução salina, observaram-se diversos graus de degradação nos diferentes ciclos climáticos.
- No conjunto de ensaios analisados, os sais mais eficazes a provocar degradação foram o sulfato de sódio, o carbonato de sódio e o sulfato de magnésio. Estes sais são muito solúveis e hidratam à temperatura e humidade a que foram realizados os ensaios.
- As soluções sulfato de sódio foram as que provocaram degradação em maior número de ensaios analisados. Para além das razões indicadas no ponto anterior este sal tem outras características que podem justificar a sua agressividade: grande aumento de volume quando passa do estado anidro para o estado hidratado, grande diminuição da solubilidade quando a temperatura baixa dos 32,3 °C, acima dos 32 °C a solubilidade também diminui mas a taxa inferior, a forma de agulha dos cristais também pode contribuir para a agressividade deste sal.
- O nitrato de sódio provocou degradação nuns ensaios e não provocou noutros ensaios.
- O sulfato de cálcio e o cloreto de sódio, dois dos sais mais comuns no ambiente, foram os que provocaram menos degradação.
- Foram apontadas as seguintes razões para a menor degradação provocada pelo cloreto de sódio nos ensaios analisados: a sua solubilidade não depende da temperatura; a sua deliquescência pode impedir que cristalize em certas condições de temperatura e humidade; nalguns casos a cristalização dos sais promoveu uma aparente consolidação dos materiais degradados, que só se desagregaram após dessalinização; o cloreto de sódio não forma compostos hidratados (excepto perto da temperatura de congelação da água), ao contrário de outros sais.
- Em serviço o cloreto de sódio provoca degradação, o que não se conseguiu observar nos ensaios analisados.
- A acção de vários sais em conjunto pode provocar mais degradação do que a acção de cada um dos sais em separado, pois a presença conjunta pode modificar as propriedades de cada um deles.

Lubelli [22] também refere que nos ensaios laboratoriais de ataque por cloreto de sódio não se têm obtido degradações, apesar deste sal poder causar danos severos em situações de serviço. Lubelli também diz que as explicações têm sido relacionadas com a dificuldade das soluções de NaCl atingirem grandes níveis de sobressaturação, com a pouca influência da temperatura na solubilidade e na humidade relativa de equilíbrio deste sal e com a mudança da fase anidra para hidratada só poder acontecer a temperaturas inferiores a 0,1 °C.

2.3.6 Mecanismos de degradação

Os mecanismos de ataque dos sais solúveis aos materiais porosos de construção podem ser divididos em dois grupos: os que induzem predominantemente alterações físicas aos materiais e os que envolvem alguma alteração química nos materiais [18].

Os mecanismos que promovem alterações químicas incluem a corrosão das armaduras do betão armado, que é acelerada na presença de cloretos; o ataque dos sulfatos ao cimento do betão; a degradação química das rochas, que pode ser acelerada pela presença de sais alcalinos; e a degradação química relacionada com a presença de humidade, que é aumentada devido às propriedades higroscópicas dos sais.

Os principais processos que promovem alterações físicas são a cristalização, a transição entre fases anidras e hidratadas e a expansão térmica dos sais.

Os sais, para além de se poderem dissolver na água, também podem formar compostos moleculares com as moléculas de água. Passam assim da fase anidra para uma fase hidratada, cuja designação depende do número de moléculas de água presente no composto molecular. A mudança de fase é acompanhada de aumento de volume, o que provoca nas paredes dos poros preenchidos uma pressão designada pressão de hidratação que pode provocar a degradação do material.

Existem sais que passam rápida e facilmente da forma anidra para formas hidratadas devido apenas a alterações de temperatura e de humidade. O aumento de volume pode ser de mais de 300 %, como no caso do sulfato e do carbonato de sódio [18].

A mudança de fase de certos sais pode ocorrer às temperaturas normais, no entanto o cloreto de sódio a estas temperaturas apenas existe na fase anidra (NaCl). A transição para a fase hidratada ($\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) só acontece a temperaturas negativas e sob humidade relativa superior a 75 % [18 e 22]. Não será portanto este o principal mecanismo responsável pela degradação provocada pela atmosfera marítima nos materiais porosos de construção.

Goudie [18] refere autores que propuseram que a dilatação térmica dos sais pode causar degradação das rochas quando o coeficiente de expansibilidade térmica dos sais for superior ao dos materiais cujos poros os sais ocupam. A expansão volumétrica da Halite entre 20 °C e 100 °C é de cerca de 0,9 %, enquanto por exemplo a dos granitos é de cerca de um terço desse valor [18].

Lubelli [22] refere, citando Winckler [23], que a expansão térmica do cloreto de sódio entre 0 °C e 60 °C é de 0,5 % e a do granito é inferior a 0,2 %, considerando esta diferença pequena. Também refere estudos que validam esta teoria e outros que mostram que a expansão térmica não provoca degradação. Tendo em conta que obteve degradação mesmo a temperatura constante, Lubelli conclui que a expansão térmica não será a principal causa da degradação.

2.3.7 Cristalização de sais

O processo de formação de cristais nas soluções salinas presentes nos poros e fissuras dos materiais é considerado o mecanismo mais importante na degradação dos materiais porosos de construção provocada por sais.

Para que a cristalização ocorra é necessário que a solução salina se encontre supersaturada e que a humidade relativa do ambiente seja inferior à humidade relativa de equilíbrio da

solução saturada de sal.

No caso do cloreto de sódio, como a solubilidade varia pouco com a temperatura, o aumento da concentração da solução salina está dependente da evaporação da água. A humidade relativa de equilíbrio das soluções saturadas de cloreto de sódio ronda os 75 % (Quadro 9) e também varia pouco com a temperatura.

Quanto maior for o grau de supersaturação das soluções maior é a velocidade de formação dos cristais [22]. O cloreto de sódio não atinge altos graus de supersaturação [22].

A velocidade de formação dos cristais influencia a sua forma e esta pode influir no nível de degradação dos materiais porosos afectados. Teresa Gonçalves [24] refere estudos [25] em que o cloreto de sódio apresenta uma menor velocidade de cristalização do que outros sais. A menor velocidade de formação de sais corresponde também uma menor pressão de cristalização [24].

Existem vários modelos teóricos que tentam explicar o mecanismo de degradação provocado pela cristalização dos sais no interior dos materiais porosos de construção, no entanto ainda não foi possível chegar a um consenso.

Também ainda não tem sido possível prever a durabilidade dos materiais face à cristalização dos sais solúveis a partir do conhecimento das propriedades dos materiais e também tem sido difícil obter um ensaio acelerado de que resulte degradação similar à degradação observada em serviço e que permita estimar a durabilidade dos materiais [22].

As principais questões a que as diversas teorias pretendem responder são onde e em que condições ocorre a cristalização e porquê que a cristalização origina a degradação.

Segundo a teoria mais difundida e mais aceite a degradação é provocada pela pressão de cristalização. Esta pressão ocorre quando os cristais se desenvolvem dentro dos poros, exercendo pressão sobre as paredes destes [22 e 24].

A pressão de cristalização pode ser calculada através da equação proposta por Correns [26], citado por Teresa Gonçalves [24]:

$$P_c = (R T / V_c) \ln (C/C_s)$$

P_c = pressão de cristalização [MPa]

R = constante do gás ideal ($8,3145 \text{ MPa.cm}^3.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T = temperatura [$^{\circ}\text{K}$]

V_c = volume molar do cristal [$\text{cm}^3.\text{mol}^{-1}$]

C = concentração do soluto durante a cristalização, portanto numa solução supersaturada

C_s = concentração do soluto numa solução saturada

C/C_s = Relação de supersaturação

Winkler e Singer [27] calcularam a partir de fórmula proposta por Correns as pressões de cristalização teóricas do NaCl, em função do grau de supersaturação e da temperatura, que se apresentam no Quadro 10 e que contém os valores apresentados por Goudie [18] convertidos para MPa.

Quadro 10 - Pressões de cristalização teóricas do NaCl

Pressão de cristalização, P_c [MPa]					
$C/C_s = 2$		$C/C_s = 10$		$C/C_s = 50$	
$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = 50^{\circ}\text{C}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = 50^{\circ}\text{C}$	$T = 0^{\circ}\text{C}$	$T = 50^{\circ}\text{C}$
55,4	65,4	184,5	219,0	313,5	373,7

Cooke e Gibbs [28], citados por Goudie [18], afirmam que as pressões de cristalização só existem quando a cristalização ocorre em espaços confinados, como no interior dos poros. Essas pressões iniciam-se quando as paredes dos poros começam a impedir o crescimento dos cristais. As pressões vão aumentando consoante a cristalização prossegue e o volume de cristais aumenta, deformando o material poroso. A pressão pára de aumentar quando o material cede ou quando é atingido o valor máximo da pressão de cristalização, P_c .

Quando as pressões teóricas de cristalização dos sais são muito superiores à resistência do material poroso, a severidade potencial do sal está mais relacionada com o seu volume de cristalização, V_c .

Os efeitos da cristalização dos sais solúveis no material poroso dependem da estrutura porosa do material e das pressões de cristalização que se desenvolvem, que são função da distribuição de tamanho de poros.

Na revisão bibliográfica realizada por Charola [29] acerca da deterioração provocada em materiais porosos e na tese de Lubelli [22] é apresentada outra equação, derivada dos trabalhos de Everett [30], que pretende relacionar a pressão de cristalização que se desenvolve entre dois poros de raios diferentes, e os seus raios:

$$\Delta p_{\text{cryst}} = 2 \gamma (1/r - 1/R)$$

Δp_{cryst} [dyn/cm²] = pressão de cristalização

r [cm] = raio do poro menor

R [cm] = raio do poro maior

γ [dyn/cm] = tensão superficial

Segundo esta teoria a cristalização ocorre primeiro nos poros maiores, servindo os poros menores como reservatórios de solução salina. Quando os poros maiores estão preenchidos a cristalização passa a ocorrer nos poros menores [18].

Tendo em conta alguns resultados experimentais vários autores introduziram correcções a esta equação para aumentar o peso dos poros menores [22 e 29]. As maiores pressões de cristalização serão desenvolvidas em materiais com um grande volume de poros menores ligados por poros maiores [22].

Lubelli refere trabalhos como o de Scherer [31] que têm em conta os dois modelos anteriores, baseado um na supersaturação das soluções salinas e o outro no diâmetro dos poros dos materiais. A pressão de cristalização obtida utilizando este modelo apenas pode

explicar a degradação em poros de dimensões nanométricas, que não existem habitualmente na maior parte dos materiais de construção tradicionais [22].

Como se observa, o mecanismo de degradação devido à cristalização de sais é um assunto controverso. Lubelli [22] reforça essa falta de consenso no caso do cloreto de sódio pois este sal não atinge o grau elevado de supersaturação necessário, segundo os modelos apresentados até aqui, para se desenvolverem pressões de cristalização suficientemente altas para provocar degradação.

Quando as pressões de cristalização não atingem valores que promovam a degradação do material, este pode ficar consolidado em vez de se degradar [18, 24 e 22]. No entanto esta consolidação poderá levar indirectamente à ocorrência de degradação, já que as zonas assim consolidadas ficam com características diferentes do restante material [18, 24 e 22].

Todos os modelos anteriores supõem situação de equilíbrio. Lubelli refere que foram propostas novas teorias que afirmam que situações transitórias, provocadas por exemplo por evaporação rápida ou por ciclos de humedificação - secagem, e consequente dissolução - cristalização dos sais, podem dar origem a pressões de cristalização elevadas em poros maiores [32]. Os efeitos destes regimes transitórios são potenciados pelas diferenças de características entre zonas contíguas dos materiais, em consequência da consolidação referida anteriormente, que pode decorrer dos próprios processos cíclicos.

Os modelos em situação de equilíbrio assumem o preenchimento dos poros pelos cristais, Lubelli [22] e Charola [29] referem outro modelo em que os sais aderem às paredes dos poros sem os preencher. Quando estes sais sofrem modificação da sua estrutura, provocada por alterações nas condições do ambiente local, afectam o material a que estão aderentes [33]. Charola afirma que este processo só pode ter um pequeno contributo na degradação enquanto Lubelli não exclui que possa provocar degradação em materiais fracos.

Outro possível mecanismo de degradação referido por Charola e Lubelli foi proposto por Snethlage e Wendler [34] e testado por Lubelli. Este modelo considera que os materiais contaminados com sais apresentam um comportamento higroscópico oposto aos materiais

não contaminados. Durante os ciclos de variação de humidade relativa os materiais contaminados expandem quando a humidade relativa baixa e contraem quando a humidade relativa sobe. Os materiais não contaminados comportam-se ao contrário.

Quando num mesmo material existem zonas contaminadas com sal contíguas a zonas não contaminadas esta diferença de comportamento gera forças de corte que podem levar à degradação do material. Lubelli obteve degradação de materiais parcialmente contaminados com cloreto de sódio e Teresa Gonçalves [24] refere trabalhos posteriores que discutem as conclusões de Lubelli.

Finalmente há que referir que o local onde ocorre a cristalização é determinante para a existência ou não de degradação. A cristalização à superfície dos materiais apenas produz efeitos visuais. Para acontecer degradação física é necessário que a cristalização ocorra não à superfície dos materiais mas sim no interior dos materiais, mas próximo da superfície, para vencer a resistência dos materiais e promover a sua degradação e a queda de material.

2.4 Casos reais

Foram estudados quatro casos de degradação de telhas cerâmicas em zonas costeiras que são apresentados nas figuras seguintes. Os tipos de degradação observados em cada caso foram classificados usando a terminologia apresentada no Quadro 7.

Os diferentes tipos de degradação são identificados principalmente pela extensão da área degradada e pela quantidade de material perdido. As imagens tentam ilustrar alguns tipos de degradação.

O Caso 1 ocorreu perto de Vieira de Leiria, Concelho da Marinha Grande, Distrito de Leiria, portanto na costa Oeste do país, com vento Norte predominante. As telhas têm três anos de serviço.



Figura 1 - Degradação natural - caso 1

Observaram-se os seguintes tipos de degradações:

- Eflorescências;
- Picamento;
- Desagregação granular;
- Escamação;
- Empolamento;
- Plaquetas;
- Folheado.

O Caso 2 ocorreu na Praia das Mações, Concelho de Sintra, Distrito de Lisboa, também na costa Oeste do país, com vento Norte predominante. Neste caso as telhas também têm três anos de serviço.



Figura 2 - Degradação natural - caso 2

Observaram-se os seguintes tipos de degradações:

- Picamento;
- Desagregação granular;
- Escamação;
- Empolamento;
- Plaquetas;
- Folheado.

O Caso 3 ocorreu na linha da costa, na Praia de Santa Cruz, Concelho de Torres Vedras, Distrito de Lisboa também na costa Oeste do país. As telhas têm onze anos de serviço, a degradação iniciou-se depois de sete anos de construção do telhado. Os telhados apresentam um declive de 20° a 30° e orientação Noroeste. Encontram-se expostos a ventos dominantes de Noroeste.



Figura 3 - Degradação natural - caso 3

Observaram-se os seguintes tipos de degradações:

- Picamento;
- Desagregação granular;
- Escamação;
- Empolamento;
- Plaquetas.

O Caso 4 também ocorreu na Praia de Santa Cruz, Torres Vedras, na costa Oeste do país, com vento Norte predominante. As telhas têm quatro anos de serviço e a degradação iniciou-se logo no primeiro ano. As telhas são hidrofugadas e foram aplicadas em águas voltadas a Norte e em águas voltadas a Sul. Encontram-se expostas a ventos dominantes de Noroeste.



Figura 4 - Degradação natural - caso 4

Observaram-se os seguintes tipos de degradações:

- Picamento;
- Desagregação granular;
- Escamação;
- Empolamento;
- Plaquetas;
- Folheado.

Os quatro casos de degradação natural referidos mostram diferentes tipos e níveis de degradação classificados como picamento, desagregação granular, escamação e plaquetas, os quais se diferenciam pela crescente extensão dos defeitos observados e crescente quantidade do material perdido. Todos os casos apresentam algum grau de empolamento, o que precede perda de mais material. Em três dos quatro casos, pode-se mesmo verificar a existência de folheado.

Aparentemente as telhas do Caso 2 perderam uma maior quantidade de material, unicamente com três anos de exposição. Isto pode ter sido causado por condições ambientais muito mais severas.

Embora as telhas do Caso 4 sejam hidrofugadas, começaram a perder material após o primeiro ano de exposição, o que é um sinal da ineficiência do produto hidrofugante ou da sua aplicação.

As telhas do Caso 1 e do Caso 2 foram sujeitas ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, tendo apresentado velocidades superiores às de telhas novas dos mesmos fabricantes.

Este facto poderá ser justificado pela existência de cristais de sal a colmatar os poros, resultando num aumento da velocidade de propagação de ultra-sons. Tal aumento também se verificou na fase experimental do estudo em que os provetes após ensaio acelerado e antes da dessalinização apresentaram maior velocidade de propagação de ultra-sons do que os provetes novos.

CAPÍTULO 3 ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE TELHAS CERÂMICAS

3.1 Tipos de telhas

Apresentam-se a seguir os tipos de telhas cerâmicas disponíveis em Portugal, classificadas segundo a sua designação e formato.

As telhas lusa, também designadas por telhas de aba e canudo, (Figura 5 e Figura 6) têm encaixe longitudinal e encaixe transversal, o que melhora a estanquidade da cobertura, quando os encaixes funcionam correctamente. A sua secção complexa, formada pela aba e pelo canudo, permite que o aspecto das coberturas seja similar ao das coberturas tradicionais de telhas de canudo.

As telhas marseilha (Figura 7 e Figura 8) foram as primeiras telhas de encaixe a ser inventadas. O principal encaixe é o longitudinal, sendo o encaixe transversal, em geral, mais simples. As juntas longitudinais desencontradas dão às coberturas uma leitura de dominantes horizontais.

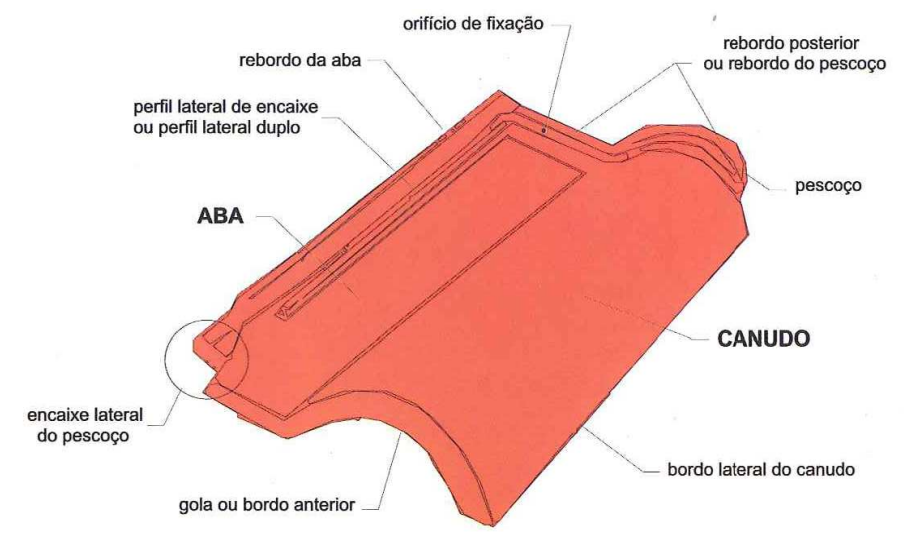


Figura 5 - Telha lusa ou de aba e canudo [2]

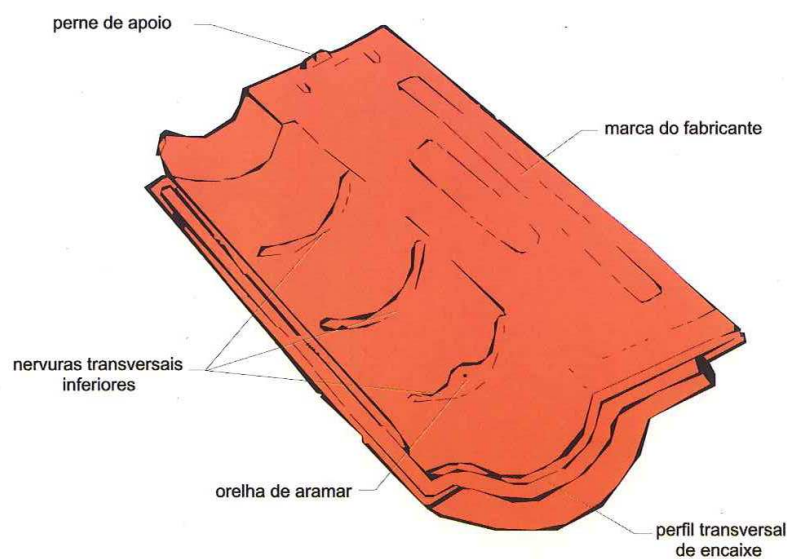


Figura 6 - Telha lusa ou de aba e canudo (tardoz) [2]

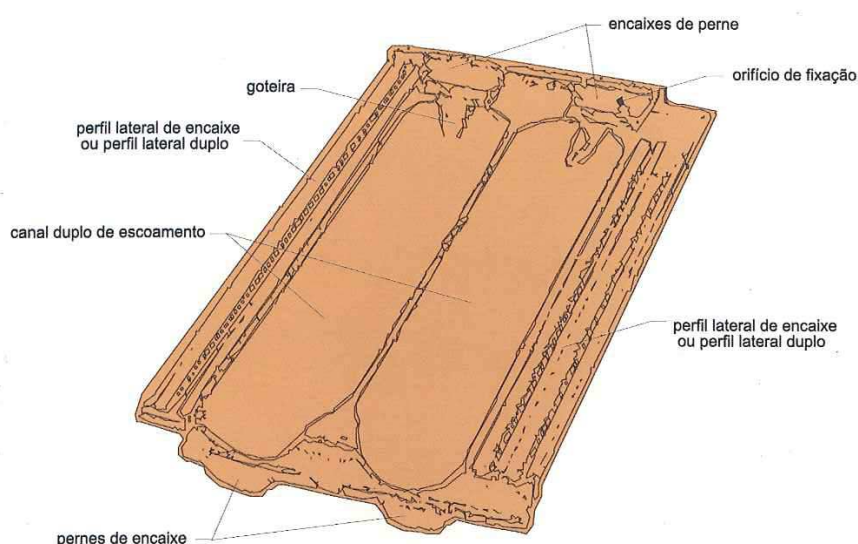


Figura 7 - Telha marselha [2]

As telhas de canudo (Figura 9) são actualmente utilizadas em edifícios históricos como capa das telhas romanas de canal. As telhas de canudo também são aplicadas no revestimento de coberturas onde se usam chapas onduladas com função de subtelhas.

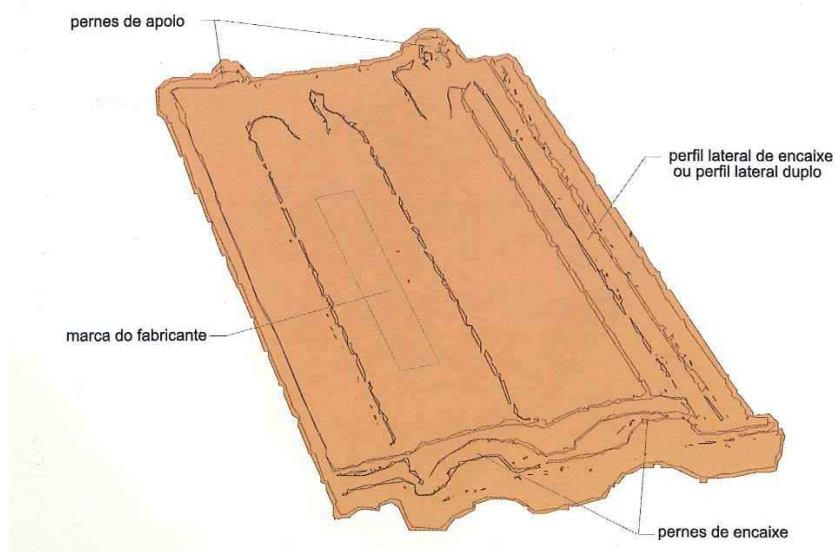


Figura 8 - Telha marselha (tardoz) [2]

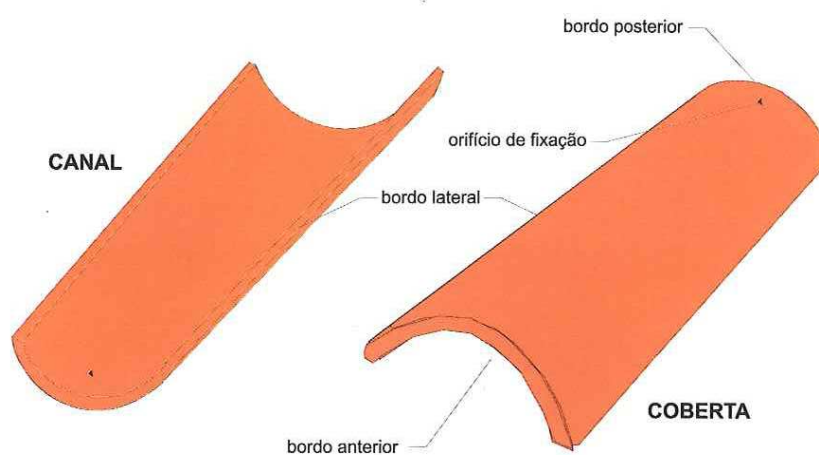


Figura 9 - Telha de canudo [2]

As telhas romanas (Figura 10) compreendem, à semelhança da cobertura do Império Romano, os canais, peças com secção de forma trapezoidal, e as cobertas, que podem ser rectangulares ou circulares. Actualmente são principalmente utilizadas em edifícios históricos.

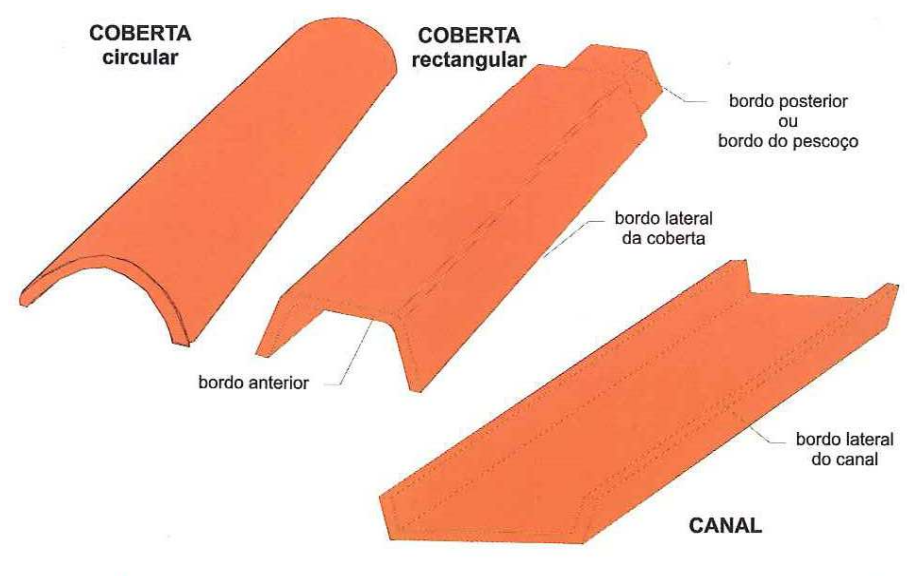


Figura 10 - Telha romana [2]

As telhas planas (Figura 11) permitem executar coberturas com aspecto similar ao das coberturas revestidas com soletos. A utilização criteriosa de telhas de diferentes cores e acabamentos permite obter telhados de belo efeito estético. À semelhança da utilização tradicional dos soletos de ardósia, também é possível executar revestimentos de paredes com telhas planas, nomeadamente revestimentos de paredes independentes do suporte [35].

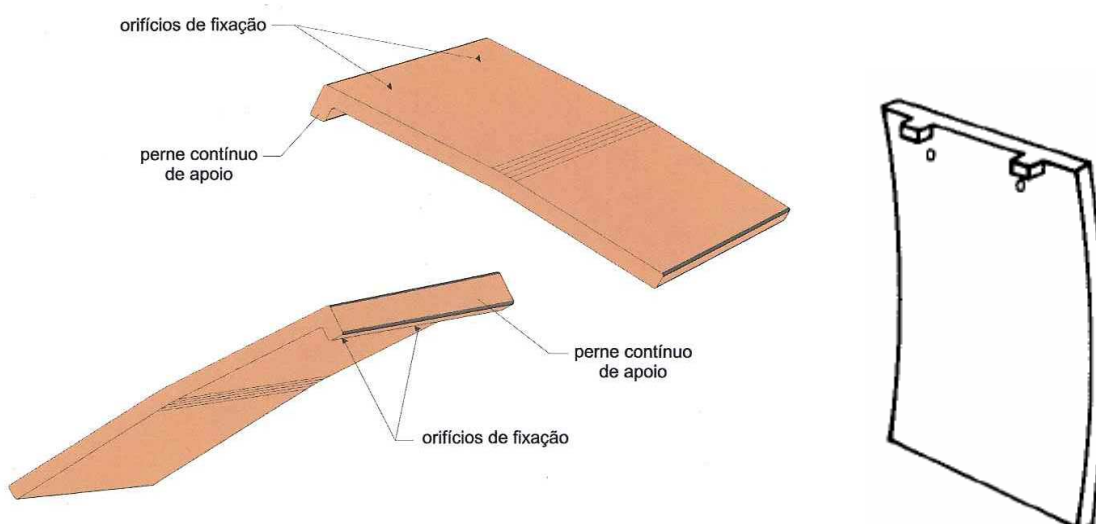


Figura 11 - Telha plana [2, 35]

Na campanha experimental foram utilizadas telhas do tipo lusa ou de aba e canudo, por serem as mais representativas da produção e utilização nacional.

3.2 Processos e tecnologias de fabrico

As telhas e tijolos comuns são produtos cerâmicos de pasta porosa, não refractários, de cor vermelha ou amarela [36]. O material que os constitui é conhecido por argila cozida, barro cozido ou barro vermelho. Em geral são cozidos a temperaturas cujos máximos podem atingir 900 °C a 1 000 °C ou 1 050 °C.

A cor vermelha das telhas e tijolos é devida à presença de ferro nas matérias-primas e à temperatura de cozedura [36, 37, 38]. Para obter os barros cozidos brancos ou branco-amarelados, constituintes das telhas geralmente designadas por telhas brancas, adicionam-se margas às matérias-primas. As margas, que são argilas calcárias, contêm carbonato de cálcio (CaCO_3) e devem ser cozidas a maior temperatura para que o CaCO_3 dê origem ao óxido de cálcio (CaO), que irá reagir com o ferro e assim atenuar fortemente a cor vermelha [36, 37 e 38]. Para se obterem barros cozidos branco-amarelados é necessário que o teor de CaO nas matérias-primas seja superior a 7 % e superior ao teor de Fe_2O_3 [1].

Genericamente o processo de fabrico das telhas cerâmicas, representado na Figura 12, engloba a extracção, composição e preparação das matérias-primas, a preparação da pasta, a conformação das telhas e a sua secagem e cozedura.

Antes da cozedura podem ser aplicados tratamentos à superfície das telhas, na forma de engobes ou vidrados, que após a cozedura conferem às telhas um aspecto superficial diferente. Os engobes permitem obter telhas com superfície de diversas cores e tonalidades, que até podem ser matizadas. Os vidrados permitem obter telhas com superfície vidrada, que pode ser de várias cores.

Após a cozedura as telhas podem ser totalmente imersas durante um certo intervalo de tempo num produto hidrofugante, que é absorvido até uma profundidade que depende do tempo de imersão. As telhas hidrofugadas têm uma absorção de água muito inferior à absorção das telhas não hidrofugadas, com um valor que depende da eficácia da hidrofugação e da manutenção dessa eficácia ao longo do tempo de serviço das telhas.

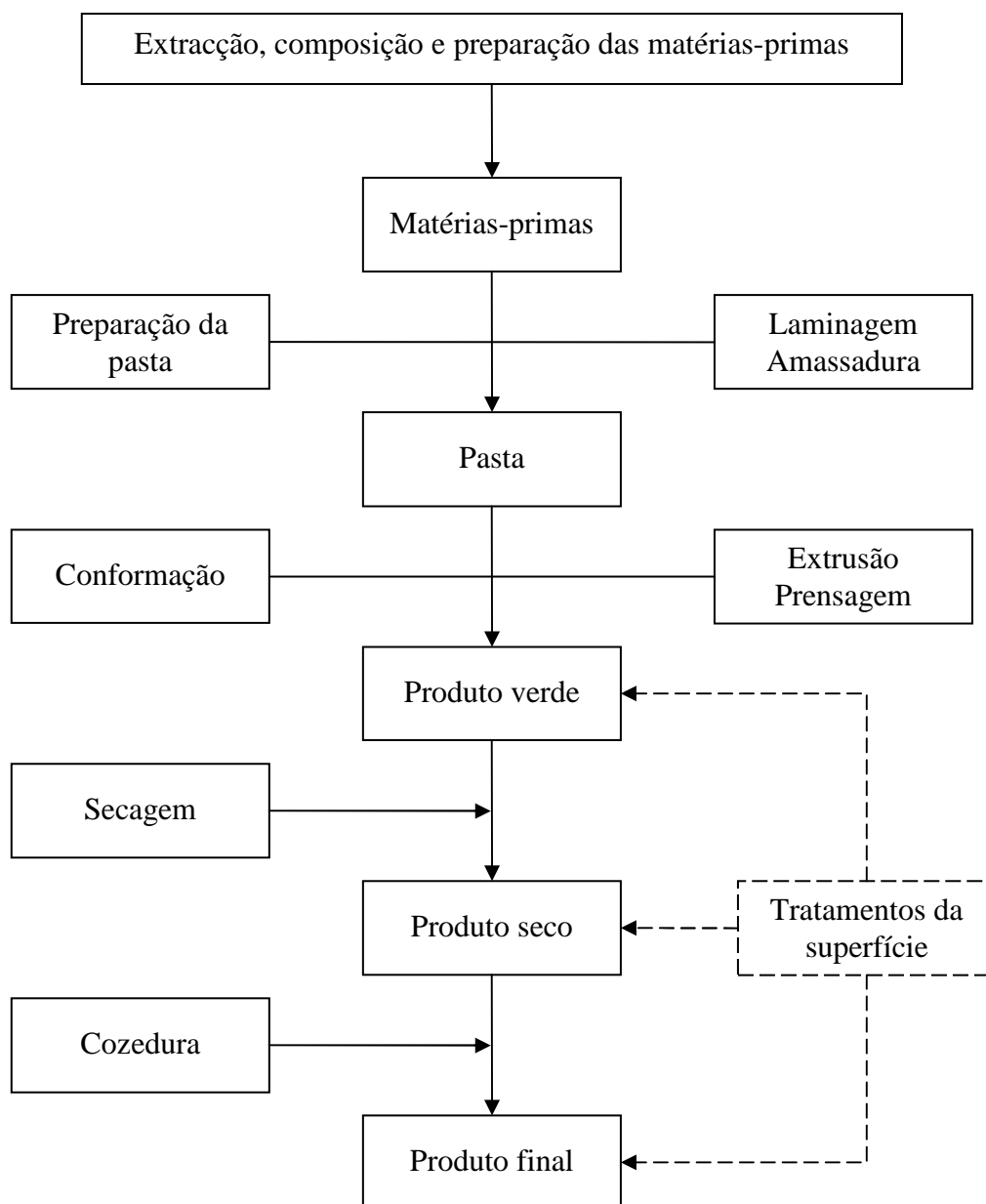


Figura 12 - Esquema genérico do processo de fabrico das telhas

Os materiais cerâmicos tradicionais são produzidos a partir de três componentes básicos: minerais argilosos, areia e feldspato. Os minerais argilosos são essencialmente aluminosilicatos hidratados ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) com pequenas quantidades de outros óxidos, tais como TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O [39].

A argila fornece as propriedades plásticas necessárias para que da mistura das matérias-primas com água resulte uma pasta que é moldável e mantém a forma após a moldagem até ser endurecida na cozedura. A sílica (SiO_2), constituinte da areia, tem um elevado ponto de fusão e é o componente refractário [39], actuando também como desgordurante, reduzindo assim a plasticidade das pastas [36]. Nos produtos cerâmicos que cozem a temperaturas inferiores a $1150\text{ }^\circ\text{C}$, como é o caso das telhas, o feldspato também actua como desgordurante [36]. Nos produtos que cozem a temperaturas superiores a cerca de $1150\text{ }^\circ\text{C}$ o feldspato actua como fundente ou vitrificante porque atinge o ponto de fusão durante a cozedura [36 e 1].

Do ponto de vista industrial ou tecnológico, as argilas utilizadas na produção de tijolos e telhas cerâmicas classificam-se no grupo das argilas comuns e dentro destas como argilas para tijolo [37]. A argila comum é a argila mais abundante e faz parte de depósitos sedimentares, geralmente do Terciário ou Quaternário, de origens diversas: glacial, eólica, fluvial ou marinha. A argila para tijolo é uma argila grosseira possuindo grande quantidade de silte e areia e com cores variadas. O teor em fracção argilosa da argila para tijolo é baixo relativamente ao de argilas para outros produtos cerâmicos, mas suficiente para permitir o desenvolvimento da plasticidade necessária para a moldagem dos corpos cerâmicos, plasticidade essa que cresce com a relação minerais argilosos/minerais não argilosos [37].

As argilas, para terem emprego na fabricação de tijolos e de telhas, devem ter plasticidade adequada para a moldagem e ter valor elevado da tensão de rotura à flexão, antes da cozedura, para permitir o manuseio durante o fabrico e após a secagem [40]. Após cozedura não devem apresentar fendas e empenos, a retracção deve ser uniforme de modo a permitir controlar as dimensões finais do produto acabado e devem apresentar elevada tensão de rotura à flexão [40]. Após cozedura a $950\text{ }^\circ\text{C}$ as argilas habitualmente utilizadas no fabrico de tijolos e telhas apresentam cor vermelha, no entanto existem argilas pobres em ferro com características cerâmicas satisfatórias para a obtenção de telhas de cores claras [40].

A preparação das matérias-primas inclui a sua dosagem, mistura e laminagem. Dentro dos laminadores a mistura das matérias-primas passa entre dois cilindros, sendo assim reduzida a sua granulometria.

Durante a preparação da pasta a mistura de matérias-primas passa novamente por laminadores e é amassada com água para se obter uma pasta homogênea e com plasticidade adequada à conformação.

A conformação das telhas pode ser realizada apenas por extrusão ou por extrusão seguida por prensagem. Neste caso a conformação é iniciada por uma extrusão da pasta para obtenção das lastras, que em seguida são prensadas para se obter a telha com o formato desejado.

As prensas mais utilizadas no fabrico de telhas cerâmicas são as designadas prensas revólver [1], como a apresentada na Figura 13. Genericamente estas prensas são constituídas por um tambor prismático que roda em torno do seu eixo colocado na horizontal e por um êmbolo vertical.

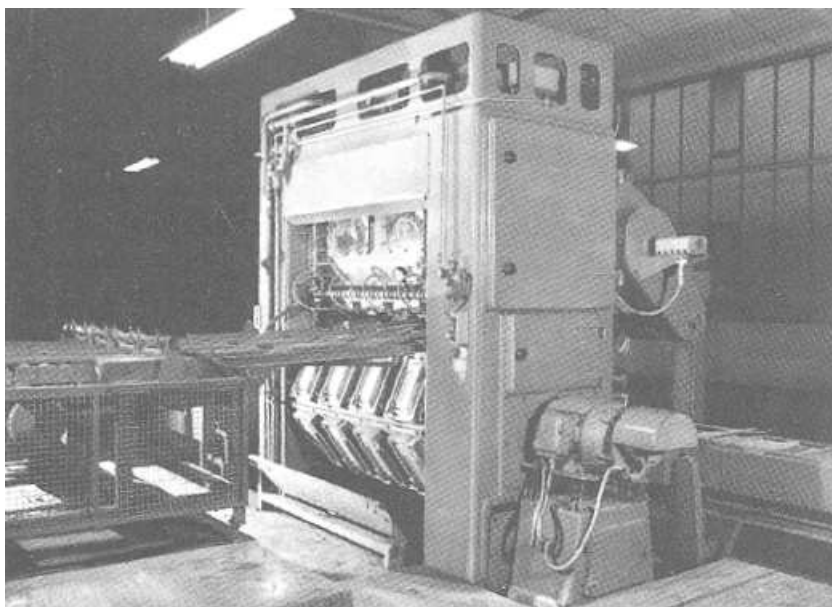


Figura 13 - Prensa revólver múltipla [1]

As faces rectangulares do tambor, em número de cinco, seis ou oito, contêm os moldes inferiores das telhas. De cada vez que o tambor pára, o êmbolo vertical, que contém o molde superior da telha na sua extremidade, desce e comprime a lastra entre os dois moldes obtendo-se assim a forma final da telha. As prensas podem atingir 25 pancadas por minuto. As prensas revólver múltiplas permitem obter mais do que uma telha em cada pancada porque o tambor possui mais do que um molde em cada face rectangular.

Os moldes podem ser metálicos ou revestidos com borracha ou gesso. Os parâmetros tecnológicos que influenciam a escolha do material dos moldes são, para além dos aspectos económicos directos, o tipo e propriedades das matérias-primas cerâmicas, o teor de água das lastras, se a extrusão das lastras foi realizada com ou sem extracção de ar e que método de desmoldagem vai ser utilizado [1]. O tipo de molde utilizado tem influência na textura da superfície final das telhas e pode contribuir para a obtenção de telhas com maior perfeição geométrica e uniformidade de dimensões.

Os moldes metálicos de ferro fundido são lubrificados com uma substância volátil de modo a que a secagem das telhas não seja afectada. No caso dos moldes de aço a desmoldagem é realizada por electrochoque [1].

Os moldes revestidos a borracha ou a gesso podem ser utilizados durante mais tempo, pois o seu revestimento vai sendo substituído periodicamente. Nos moldes revestidos a gesso é possível modificar o modelo de telha fazendo um novo revestimento para o mesmo molde. Em alguns moldes revestidos a borracha também é possível fazer alguns ajustamentos na geometria das telhas sem ser necessário fabricar um molde todo novo [1].

Os moldes de borracha não permitem obter arestas completamente vivas e a sua superfície é rugosa para possibilitar a desmoldagem, o que faz com que a superfície das telhas também seja rugosa. A utilização destes moldes requer que as lastras tenham menor teor de água do que com os outros tipos de moldes.

Na produção de telhas com as tecnologias mais recentes são utilizados moldes de gesso. Estes moldes permitem obter telhas com arestas vivas e maior precisão dimensional,

possibilitando assim a concepção de modelos com juntas mais complexas e otimizadas para que a estanquidade da cobertura seja garantida mesmo com menores recobrimentos das telhas e inclinações inferiores das coberturas. Os moldes de gesso são porosos, o que auxilia a desmoldagem. Estes moldes permitem obter telhas com superfícies lisas.

A maior ou menor rugosidade da superfície das telhas pode influenciar o seu comportamento face ao tipo de agressão que pode existir em ambientes marítimos, nomeadamente a cristalização de sais imediatamente abaixo da superfície.

Após conformação as telhas são colocadas em vagões onde serão transportadas durante as restantes fases de produção. A disposição das telhas nos vagões pode contribuir para a diminuição das deformações das telhas e maior uniformidade da cozedura em cada telha e em cada conjunto de telhas transportado no vagão.

Nas tecnologias menos recentes as telhas são unidas com arames em conjuntos de vários elementos que são empilhados ao cutelo sobre os vagões (Figura 14a). Como os conjuntos de telhas apoiam uns nos outros esta disposição pode originar deformações e empenos. Estando as telhas encostadas umas às outras, a circulação do ar durante a secagem e a cozedura é dificultada, o que pode originar diferenciais de temperatura nas superfícies de cada telha e entre telhas. Este método de carga dos vagões só pode ser utilizado em produtos com resistência suficiente em verde e com baixa retracção de cozedura. Não pode ser utilizado em telhas revestidas com engobes ou vidrados.

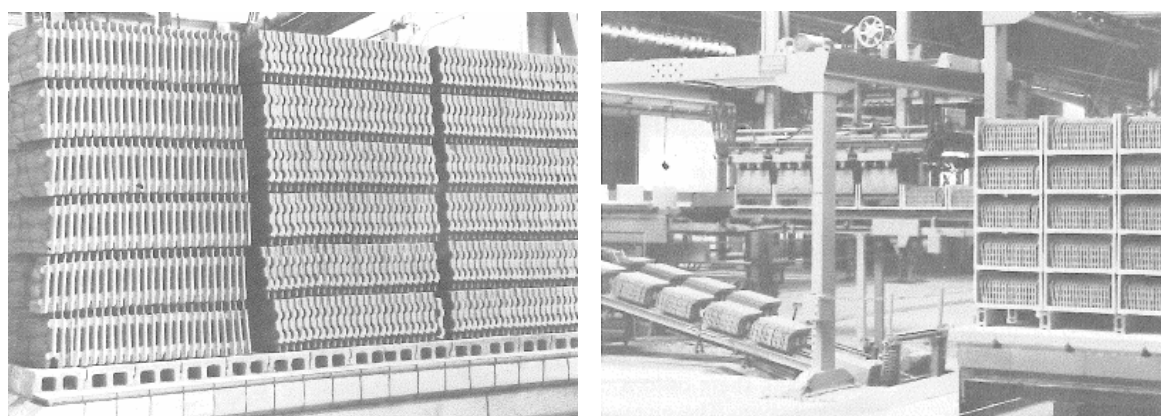


Figura 14 - Disposição das telhas nos vagões unidas com arames (a) e colocadas em suportes refractários (b) [1]

Nas tecnologias mais recentes as telhas são colocadas em suportes refractários que são empilhados nos vagões (Figura 14b). Existem suportes em que as telhas ficam ao cutelo, outros em que as telhas ficam oblíquas e noutros as telhas são colocadas horizontalmente. Os suportes assentam uns nos outros e assim as telhas não têm que suportar o peso das que estão por cima. No caso de suportes individuais as telhas ficam afastadas umas das outras, o que permite uma maior circulação de ar e consequentemente a secagem e a cozedura das telhas são mais uniformes.

A secagem das telhas pode ocorrer ao longo de secadores túnel ou em câmaras de secagem estática. Durante a secagem as telhas sofrem retracções e como a secagem não é uniforme, começando à superfície e passando depois para o interior, é muito importante controlar a operação de secagem para evitar a formação de fissuras e deformações excessivas. Em geral, a secagem das telhas deve ser mais lenta do que a dos tijolos, dada a maior espessura das telhas em comparação com a espessura dos septos dos tijolos furados.

A cozedura é a última operação do processo de fabrico, excluindo eventuais tratamentos superficiais posteriores, e a que confere ao produto seco as propriedades finais dos materiais cerâmicos cozidos.

O material cerâmico cozido é em geral composto por cristais envolvidos por uma matriz vítrea [17]. A fase cristalina é constituída por Mulite, por Quartzo e por outros cristais em menor quantidade. A fase vítrea resulta da transformação, durante o arrefecimento, da fase líquida que se forma durante a cozedura. Ao arrefecer esta fase líquida não cristaliza e transforma-se num material vítreo.

Na indústria cerâmica moderna os tipos de fornos mais utilizados para o fabrico das telhas são os fornos túnel, fornos contínuos e lineares que são percorridos pelos vagões que transportam as telhas. A zona de queima é fixa e localizada aproximadamente a meio do forno. Ao percorrer o forno túnel as telhas são sujeitas a variações de temperatura, começando por uma zona de aquecimento, seguida da zona de temperatura máxima e por fim uma zona de arrefecimento.

Na Figura 15 apresenta-se uma curva de cozedura genérica tendo em ordenadas a temperatura e em abcissas a distância percorrida ou o tempo decorrido. No caso das telhas a temperatura máxima pode variar de 950 °C a 1050 °C e o tempo de passagem no forno de 15 horas a 48 horas.

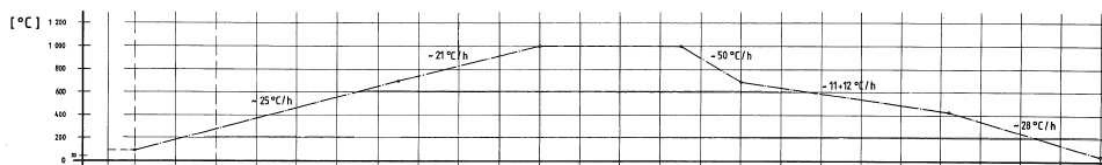


Figura 15 - Curva de cozedura em forno túnel [1]

A curva de temperatura a que as telhas são submetidas ao longo do seu percurso nos fornos industriais é estabelecida tendo em atenção as transformações que a pasta sofre durante a cozedura. Essas curvas são constituídas por troços de aquecimento e de arrefecimento cujas velocidades vão variando ao longo da cozedura e por patamares de temperatura fixa. As telhas devem aquecer e arrefecer gradualmente de modo a não sofrerem choques térmicos violentos. As velocidades de aquecimento e arrefecimento óptimas dependem de vários factores entre os quais se encontra o tipo de matérias-primas.

O controlo da temperatura durante a cozedura é muito importante, pois diferenças de 50 °C a 100 °C podem alterar as propriedades do material cozido [17]. A temperatura deve aumentar lentamente para permitir a libertação dos materiais voláteis e a ocorrência da oxidação antes da temperatura voltar a subir.

Os parâmetros de cozedura dependem das características das matérias-primas e do estado do produto que é introduzido no túnel e influenciam as propriedades dos materiais cerâmicos cozidos. Esses parâmetros incluem a temperatura máxima atingida, a velocidade de passagem dos vagões, a duração da cozedura, a atmosfera do forno e o combustível utilizado.

O fabrico das telhas termina com um tratamento superficial final, caso exista, e com a colocação em paletes protegidas por filme plástico.

3.3 Influência de alguns parâmetros de fabrico nas propriedades das telhas e na sua durabilidade

3.3.1 Influência das matérias-primas no fabrico e propriedades dos materiais cerâmicos cozidos

A retracção de secagem depende muito da quantidade de água adicionada durante a amassadura. Esta deve ser apenas a suficiente para que as pastas adquiram a plasticidade necessária para a conformação [1]. Convém portanto utilizar matérias-primas com baixo limite de plasticidade, para que tenham comportamento plástico adicionando pouca água e expandam menos durante a amassadura (misturas magras¹), e cujo limite de retracção esteja próximo do limite de plasticidade, para diminuir a retracção de secagem. Por estas razões o teor de material muito fino nas matérias-primas deve ser limitado. Neste caso também é expectável menor retracção de cozedura.

A origem das matérias-primas e a sua composição granulométrica, mineralógica e química são responsáveis pelo seu diferente comportamento durante o fabrico dos materiais cerâmicos cozidos e também influenciam as propriedades destes.

A designação das fracções granulométricas dos solos segundo a sua classificação textural é a indicada no Quadro 11 [41]. Genericamente as matérias-primas dos produtos cerâmicos têm predominância da fracção granulométrica designada Silte [1].

Quadro 11 - Fracções granulométricas dos solos

Designação	Intervalo de diâmetros das partículas [mm]
Areia	0,06 – 2
Silte	0,002 – 0,06
Argila	< 0,002

¹ Argilas magras, gordas ou plásticas e argilas equilibradas - designações relacionadas com o comportamento das matérias-primas em contacto com a água. Matérias-primas com muita argila são muito plásticas, expandem mais ao serem misturadas com a água e retraem mais durante a secagem. É necessário haver um equilíbrio em que têm plasticidade suficiente para poderem ser moldadas e reterem essa forma, mas de modo a que a expansão em presença de água e a subsequente retracção de secagem sejam minimizadas.

Considerando as matérias-primas com composições mineralógica e química adequadas, Winkler propôs intervalos de teores de fracções granulométricas favoráveis para o fabrico dos diversos produtos cerâmicos [1]. No caso das telhas cerâmicas são aconselháveis os teores das fracções granulométricas indicados no Quadro 12 [1].

Quadro 12 - Teores de fracções granulométricas adequadas para telhas cerâmicas

Fracção granulométrica [mm]	Teores aconselhados [%]
< 0,002	22 a 55
0,002 a 0,020	10 a 50
> 0,020	< 50

A distribuição granulométrica das fracções inferiores a 0,002 influencia a trabalhabilidade das pastas, o teor de água necessário para a amassadura e a retracção de secagem [1].

Como se observa no Quadro 12, Winkler admite que um teor de argila da ordem de 50 % pode ainda ser utilizado no fabrico de telhas. Neste caso as matérias-primas não têm predominância de Silte, como foi referido ser preferível, e deverão existir precauções na secagem para evitar defeitos devido às retracções que previsivelmente serão maiores.

O comportamento das matérias-primas em presença da água depende não apenas da granulometria mas também dos tipos de minerais presentes. A mineralogia da fracção influencia a plasticidade, o teor de água necessário na amassadura e a retracção de secagem. Por exemplo, matérias-primas com Montmorilonite apresentam maior retracção de secagem, enquanto a presença de carbonatos finamente moídos reduz essa retracção [1].

A composição granulométrica, mineralógica e química das matérias-primas também influenciam as transformações que ocorrem durante a cozedura, o comportamento dos produtos durante a cozedura e as propriedades dos materiais cerâmicos cozidos.

A distribuição granulométrica das matérias-primas influencia ainda a resistência mecânica e a resistência ao gelo das telhas cerâmicas [1]. As telhas produzidas com argilas gordas,

também designadas argilas plásticas, por oposição a argilas magras, têm menor resistência mecânica e menor resistência ao gelo [1].

Das correlações referidas decorre naturalmente também uma relação estreita entre a composição da matéria-prima, em termos granulométricos, mineralógicos e químicos, e a estrutura porosa do material cerâmico cozido, que por sua vez determina em grande parte o comportamento face à acção da água.

As propriedades das matérias-primas, os parâmetros de fabrico e as propriedades das telhas cerâmicas estão portanto interligados e são interdependentes.

3.3.2 Influência da temperatura de cozedura nas propriedades e durabilidade dos materiais cerâmicos

Giuseppe Cultrone et. al. [42] analisaram a influência da mineralogia e composição das matérias-primas e da temperatura de cozedura nas características físicas (como a porosidade e a distribuição de tamanho de poros) e mecânicas de material cerâmico cozido e na sua durabilidade. Utilizaram dois tipos de matérias-primas: uma argila calcária com elevado teor de carbonatos (calcite e dolomite) e outra argila não calcária.

Ambas as argilas foram cozidas em forno eléctrico utilizando um aumento de temperatura de 3 °C por minuto, um patamar à temperatura de 100 °C durante 1 hora e um patamar à temperatura máxima durante 3 horas. Cada um dos tipos de argila foi cozido às cinco temperaturas máximas de 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C e 1100 °C.

No Quadro 13 apresentam-se os tipos de características das matérias-primas e dos diversos materiais cerâmicos cozidos obtidos no estudo [42]. A análise mineralógica incidiu sobre os dois tipos de argila utilizados e sobre os materiais cerâmicos cozidos. As restantes características foram determinadas nos materiais cerâmicos cozidos às diversas temperaturas.

Quadro 13 - Tipos de características das matérias-primas e dos materiais cerâmicos cozidos determinadas no estudo [42]

Tipo de característica		Característica
Composição das matérias-primas	Composição mineralógica da argila não calcária	Teores de quartzo, filosilicatos, e feldspato
	Composição mineralógica da argila calcária	Teores de quartzo, filosilicatos, feldspato e carbonatos (calcite e dolomite)
Composição dos materiais cerâmicos cozidos	Composição mineralógica da fase cristalina	Teor dos componentes residuais: quartzo, filosilicatos, feldspato e carbonatos
		Teor dos cristais formados durante a cozedura: hematite, mulite, wollastonite, diopside e gehlenite
	Fase amorfa	Teor da fase amorfa
Absorção de água		Absorção de água ao longo do tempo
		Absorção de água
		Coefficiente de absorção
Comportamento em secagem		Perda de massa ao longo do tempo durante secagem
		Índice de secagem
Capilaridade		Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo
		Absorção de água por capilaridade
		Coefficiente de absorção capilar
Massa volúmica		Massa volúmica aparente
Ultra-sons		Velocidade de propagação de ultra-sons

Quadro 13 - Tipos de características das matérias-primas e dos materiais cerâmicos cozidos determinadas no estudo [42] (cont.)

Tipo de característica	Característica
Porosidade	Porosidade aberta
Porosimetria	Distribuição de tamanho de poros
	Volume de poros
Análise de imagens obtidas por microscopia electrónica	Porosidade total
	Distribuição de tamanho de poros com raio $> 0,5 \mu\text{m}$
	Forma dos poros
	Distribuição espacial dos poros
	Conectividade dos poros

A análise dos resultados permitiu a Giuseppe Cultrone et. al. [42] obterem as seguintes conclusões principais:

- A cozedura dos materiais cerâmicos produz uma série de alterações mineralógicas, físicas e de textura que dependem de variados factores e influenciam a porosidade.
- Matérias-primas com alto teor da fracção granulométrica designada por areia originam materiais cerâmicos cozidos muito porosos e permeáveis.
- A argila calcária deu origem a material cozido com pouca ou nenhuma hematite enquanto a cozedura da argila sem carbonatos promoveu sempre a formação de hematite em todas as temperaturas.
- Para temperaturas de cozedura inferiores a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ o material cerâmico cozido calcário apresentou maior teor de fase não cristalina e portanto era o mais vitrificado. Para temperaturas superiores ou iguais a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi o material cozido obtido da argila não calcária que ficou mais vitrificado.
- Geralmente produtos cozidos a temperaturas mais elevadas são mais vitrificados, têm menor porosidade e sofrem maiores contracções. A contracção e a correspondente

redução excessiva de porosidade durante a cozedura podem ser reduzidas misturando às matérias-primas pó de tijolo obtido das mesmas matérias-primas.

- A presença ou ausência de carbonatos na matéria-prima dos tijolos influencia a porosidade e portanto a estrutura dos tijolos e as suas propriedades físicas e mecânicas.
- A presença de carbonatos na argila promove a formação de fissuras e de poros com raio inferior a 1 μm quando os tijolos são cozidos a temperaturas máximas entre 800 °C e 1000 °C. A ausência de carbonatos promove a redução da porosidade e o aumento significativo da fracção de poros com raio superior a 1 μm à medida que a temperatura de cozedura aumenta.
- Estes autores compararam a porosidade e a distribuição de tamanho de poros obtidos através de ensaios hídricos, da porosimetria de mercúrio e da análise digital de imagens obtidas pelo microscópio electrónico e concluíram que a utilização de várias técnicas melhora a caracterização do sistema poroso dos materiais.
- Foi verificada uma boa correlação entre a absorção de água e o comportamento em secagem dos tijolos e a sua porosidade e distribuição de tamanho de poros.
- Da caracterização da estrutura poros e da evolução da velocidade de transmissão de ultra-sons ao longo do tempo conseguiram obter informação útil para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos e a sua durabilidade.

3.3.3 Influência da estrutura porosa na durabilidade de materiais porosos

O guia CIB/RILEM relativo à previsão do tempo de vida útil de materiais e componentes de construção [17] considera que a porosidade e a permeabilidade são as características mais importantes para condicionar a acessibilidade da água ao interior dos tijolos utilizados em alvenarias, e as consequências nefastas que daí podem decorrer. Tal poderá ser extrapolável para os restantes materiais cerâmicos cozidos. O guia refere que os diâmetros críticos de poros se situam no intervalo de 1 μm a 3 μm e que em geral os produtos mais duráveis têm poros maiores e baixa porosidade.

O volume de poros e o seu tamanho determinam a capacidade dos materiais porosos absorverem e reterem água ou soluções salinas e a sua circulação no interior dos materiais, o que favorece a sua deterioração [42]. As variações da porosidade também afectam a resistência mecânica dos materiais de construção [42].

A porosidade e, particularmente, a distribuição de tamanho de poros têm sido consideradas parâmetros principais para determinar a durabilidade de diferentes materiais de construção, entre os quais os tijolos, sujeitos a vários ambientes agressivos (chuvas ácidas, cristalização de sais e ciclos de gelo-degelo). Tem sido experimentalmente demonstrado que tijolos, pedras e argamassas com elevada porosidade e elevada percentagem de poros com raio inferior a cerca de 1 μm a 2,5 μm são mais susceptíveis, particularmente à cristalização de sais e ao gelo-degelo [42]. De novo é possível extrapolar esta correlação para os materiais cerâmicos em geral.

Como foi referido em 2.1, a norma europeia EN 1304:2007 [6] e a norma norte americana ASTM C 1167 - 03 [11] consideram a durabilidade das telhas cerâmicas relativamente à sua resistência ao gelo.

Na norma europeia a durabilidade é avaliada pelas alterações de aspecto e perda de massa das telhas após serem submetidas a um ensaio acelerado constituído por ciclos de gelo-degelo.

A norma americana permite avaliar indirectamente a durabilidade ao considerar a possibilidade de relacionar algumas propriedades das telhas com a sua durabilidade. Esta norma estabelece três níveis de durabilidade face ao gelo. Ao primeiro nível pertencem as telhas com resistência à acção severa do gelo, no segundo nível estão as telhas com resistência à acção moderada do gelo e no terceiro nível as telhas com baixa resistência à acção do gelo.

A classificação das telhas em níveis de desempenho expectável é obtida a partir dos valores da absorção de água fria das telhas e do coeficiente de saturação, de acordo com o Quadro 14 [11]. A absorção de água fria é calculada após imersão das telhas durante

24 horas. O coeficiente de saturação é o quociente entre a absorção de água fria e a absorção de água em ebulição. A absorção de água em ebulição é calculada após imersão durante 5 horas. As telhas classificadas como mais duráveis são as que apresentam menor absorção de água fria e menor coeficiente de saturação.

Quadro 14 - Relação entre a durabilidade e a absorção de água das telhas cerâmicas

Nível expectável de resistência ao gelo	Absorção de água fria máxima [%]		Coeficiente de saturação máximo	
	Média de cinco telhas	Valor individual	Média de cinco telhas	Valor individual
Nível 1 Resistência à acção severa do gelo	6	8	0,74	0,76
Nível 2 Resistência à acção moderada do gelo	11	13	0,80	0,82
Nível 3 Baixa resistência à acção do gelo	13	15	0,84	0,86

Quando as telhas não são conformes com as exigências do nível 3 do Quadro 14 a norma admite a avaliação da durabilidade através do ensaio de 50 ciclos de gelo-degelo.

Vários estudos foram realizados para tentar relacionar parâmetros de fabrico das telhas com as suas propriedades e características e com a sua durabilidade.

Num estudo recente realizado por Mariarosa Raimondo et. al. [43] foi avaliada a influência de características físicas, porosimétricas e de composição de telhas cerâmicas na sua durabilidade no que respeita ao comportamento face ao gelo.

Nesse estudo [43] foram utilizadas telhas de treze fábricas diferentes, 11 de diversas regiões de Itália, 1 da Suíça e 1 de Portugal. Cinco eram do formato telha marselha e 7 do formato aba e canudo ou lusa. Todas estas doze foram produzidas por extrusão seguida de

prensagem. As telhas de um dos tipos eram de formato “Coppo” e obtidas apenas por extrusão. A temperatura máxima de cozedura das telhas variou entre 900 °C e 1050 °C com ciclos térmicos de 24 horas a 48 horas entre a entrada e a saída do forno.

No Quadro 15 apresentam-se as características das telhas determinadas nesse estudo: composição mineralógica da fase cristalina e teor da fase amorfa, porosidade (total e aberta), massa volúmica aparente, absorção de água (em diversas condições experimentais), porosimetria (volume de poros, tamanho, distribuição do tamanho dos poros e superfície específica) e capilaridade.

Os treze tipos de telhas referidos foram sujeitos a um ensaio de gelo-degelo, de acordo com a norma europeia aplicável a telhas cerâmicas [14], mas mais severo. As telhas foram sujeitas a 400 ciclos em vez dos 150 ciclos especificados na norma europeia. O comportamento das telhas sujeitas a ensaio foi avaliado através do número de ciclos a que resistiram, dos defeitos provocados pelo ensaio e da perda de massa, que foi inferior a 1 % em todas as telhas.

Quadro 15 - Tipos de características das telhas determinadas no estudo [43]

Tipo de característica	Característica		Unidades
Composição do material cerâmico	Composição mineralógica da fase cristalina	Teor dos componentes residuais: Quartzo, Feldspato potássico, Illite/Mica	%
		Teor dos vários silicatos de cálcio formados durante a cozedura	%
	Fase amorfa	Teor da fase amorfa	%
Massa volúmica	BD	Massa volúmica aparente	g/cm ³
Porosidade	OP	Porosidade aberta	%
	TP	Porosidade total	%
Absorção de água	WA	Absorção de água	%
	WA _{4 h}	Absorção por imersão em água fria durante 4 horas	%
	WA _{24 h}	Absorção por imersão em água fria durante 24 horas	%
	WA _{5 h}	Absorção por imersão em água em ebulição durante 5 horas	%
	C _s	Coeficiente de saturação WA _{24 h} / WA _{5 h}	-
Porosimetria	MD	Diâmetro médio dos poros	μm
	PV	Volume de poros	cm ³ /g
	P3	Percentagem de poros com diâmetro superior a 3 μm	%
	Φ 50	Mediana do diâmetro dos poros	μm
	Φ 90	Percentil 90 da distribuição de diâmetro de poros	μm
	PSS	Superfície específica dos poros	m ² /g
Capilaridade	K _s	Coeficiente de capilaridade	g/(cm ² s ^{1/2})

A partir das características das telhas, Mariarosa Raimondo et. al. [43] calcularam factores de durabilidade usando as fórmulas decorrentes de modelos empíricos de previsão da durabilidade face ao gelo propostos por seis autores. No Quadro 16 apresenta-se a tabela, compilada por Mariarosa Raimondo, com os autores, as equações para o cálculo dos factores de durabilidade e a classificação do comportamento face ao gelo propostas.

Quadro 16 - Classificação da durabilidade face ao gelo segundo vários modelos propostos

Autores	Factor de durabilidade DF	Produtos resistentes ao gelo	Produtos susceptíveis ao gelo
Maage [44, 45]	$3,2 / PV + 2,4 P3$	$DF > 70$	$DF < 70$
Arnott [46]	$9,2P3 - 0,5 Ks + 423(WA_{5h} / WA) - 100 Ks Cs - 84,5$	Valores de DF altos	—
Franke e Bentrup [47, 48]	$\Phi 50$	$\Phi 50 \geq 1,65 \mu m$	$\Phi 50 \leq 0,60 \mu m$
Koroth et al. [49, 50]	$450 (2,94 + WA_{5h}) + 330 (1 - WA_{4h}/WA_{5h})$	$DF > 85$	$DF < 70$
Robinson [51]	$[Ks/10 (1-Cs)] + (WA_{24h} - 10)$	Valores de DF baixos	—
Vincenzini [52]	$\Phi 90$	$\Phi 90 \geq 1,80 \mu m$	$\Phi 90 \leq 0,50 \mu m$

Mariarosa Raimondo et. al. [43] não encontraram uma boa correlação entre os factores de durabilidade obtidos pelos modelos propostos e o número de ciclos do ensaio de gelo-degelo a que as telhas resistiram. A classificação da durabilidade face ao gelo proposta pelos modelos também nem sempre teve correspondência com os resultados experimentais obtidos. Os autores do estudo experimental referem que provavelmente os modelos serão válidos para amostras homogéneas em termos de composição e tecnologia de fabrico.

Mariarosa Raimondo et. al. [43] usaram várias técnicas de análise estatística para tentar relacionar o número de ciclos de gelo-degelo a que as telhas resistiram e diversas propriedades físicas (TP, BD, P3, PSS, Φ 50 e Φ 90) e de composição das telhas (teor de quartzo, teor da fase amorfa e teor de silicatos de cálcio). Obtiveram as seguintes resultados principais:

- A resistência ao gelo está relacionada de forma complexa com diversas variáveis e portanto vários parâmetros influenciam simultaneamente essa resistência.
- A massa volúmica pode ser considerada a característica mais influente, a maiores valores da massa volúmica, provavelmente relacionada com menor porosidade, correspondem maiores durabilidades face ao gelo.
- As telhas que resistiram a um maior número de ciclos de gelo-degelo apresentavam valores mais elevados das seguintes características: teor de poros com diâmetro superior a 3 μ m (P3), mediana do diâmetro dos poros (Φ 50) e percentil 90 da distribuição de diâmetro de poros (Φ 90).
- As telhas com maior resistência ao gelo apresentavam valores inferiores das seguintes características: superfície específica dos poros (PSS) e teor da fase amorfa.
- Relativamente à composição das telhas, um teor mais elevado de silicatos de cálcio aumenta a resistência ao gelo enquanto maiores teores de quartzo e de fase amorfa podem diminuir a resistência ao gelo.

Mariarosa Raimondo et. al. [43] concluem que para a obtenção de telhas cerâmicas com um comportamento face ao gelo excelente e superior ao exigido pelas normas aplicáveis é necessário intervir nos parâmetros de fabrico de modo a obter produtos não só com características físicas mas também com composição mineralógica e teor da fase amorfa favoráveis:

- Maior massa volúmica corresponde a maior durabilidade face ao gelo.
- O teor de silicatos de cálcio deve ser superior ou igual a 40 %.
- O teor da fase amorfa deve ser inferior a 20 %.
- O teor de poros com diâmetro superior a 3 μ m deve ser elevado.

O teor de CaO das matérias-primas deve ser optimizado de modo a permitir a obtenção de telhas com uma estrutura de poros grandes e ao mesmo tempo permitir a formação de silicatos de cálcio em teores superiores a 40 % [43]. Teores elevados de CaO favorecem a obtenção de baixos teores de fase amorfa. O aumento da temperatura máxima de cozedura contribuiu para todos os objectivos enunciados [43].

Para que ocorra degradação devida ao gelo no interior dos materiais porosos é necessário que a temperatura seja negativa, que exista água e que o volume do poro não seja suficiente para acomodar o aumento de volume da água ao gelar. Portanto uma menor quantidade de poros capilares e um grande teor de poros de dimensões elevadas diminui a capacidade do material absorver água por capilaridade, e permite acomodar melhor o aumento do volume da água.

3.3.4 Caracterização da durabilidade de materiais cerâmicos

Como se verificou nos sub-capítulos anteriores muitos factores influenciam a durabilidade. Apesar da quantidade de estudos já realizados, não existem ainda modelos experimentais ou analíticos que permitam prever essa durabilidade a partir da composição das matérias-primas e das características dos materiais cerâmicos cozidos.

Por outro lado os estudos realizados incidem exclusivamente na resistência ao gelo e não analisam outros factores de degradação. Confirma-se portanto a necessidade de realizar estudos experimentais que permitam relacionar, ainda que qualitativamente, parâmetros de composição e de fabrico com o comportamento sob a acção do nevoeiro salino dos materiais cerâmicos cozidos.

CAPÍTULO 4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS POROSOS DE CONSTRUÇÃO: COMPILAÇÃO, ANÁLISE CRÍTICA E SELECÇÃO DOS ENSAIOS

Neste Capítulo são apresentados alguns ensaios, previstos em documentação diversa, para determinar as características hídricas e mecânicas dos materiais porosos de construção, apresentando-se também ensaios de cristalização de sais.

É feita a análise crítica desses procedimentos de ensaio e a selecção dos ensaios a utilizar na campanha experimental. No Capítulo 5 serão apresentadas as adaptações que foi necessário introduzir nos procedimentos de ensaio, quando o tipo de provetes utilizados o exigiu.

Os ensaios seleccionados serão utilizados para caracterização de telhas novas e dos provetes delas retirados. Também serão realizados após sujeição dos provetes a ensaios de envelhecimento acelerado.

4.1 Características hídricas

As características hídricas das telhas cerâmicas condicionam o seu desempenho no que diz respeito à protecção à água. Sendo essa a função principal das telhas, a determinação das referidas características é particularmente importante para a caracterização das telhas cerâmicas e para a avaliação da sua adequabilidade ao uso.

As características hídricas dos materiais porosos de construção condicionam a sua capacidade de absorver e reter água ou soluções salinas e também a circulação destas no interior dos materiais. Como já foi referido estes são factores importantes que influenciam a durabilidade deste tipo de materiais.

Nos ensaios em que os provetes são imersos para determinação das suas características hídricas essa imersão pode ser em água fria à pressão atmosférica, em água em ebulição à pressão atmosférica ou em água sob vácuo.

A partir das massas dos provetes secos e após imersão calculam-se as características:

- Absorção por imersão em água fria à pressão atmosférica;
- Absorção por imersão em água em ebulição à pressão atmosférica;
- Absorção por imersão em água sob vácuo;
- Coeficiente de saturação (quociente entre a absorção de água fria e a absorção de água em ebulição; ou quociente entre a absorção de água fria e a absorção de água sob vácuo).

Procedendo à determinação da massa dos provetes por pesagem hidrostática, ou seja, estando os provetes imersos, é possível calcular ainda outras características:

- Massa volúmica aparente;
- Massa volúmica real da matéria impermeável;
- Porosidade aberta.

Para obter a massa volúmica real e as porosidades total e fechada é necessário moer e secar o material e usar um picnómetro ou um volumínímetro de Le Chatelier.

Outros tipos de ensaios permitem determinar as seguintes características:

- Impermeabilidade;
- Absorção de água por contacto superficial de esponja;
- Absorção de água a baixa pressão (método do cachimbo);
- Porometria ou porosimetria por mercúrio.

De seguida são apresentados vários procedimentos de ensaio e é feita uma análise crítica de ensaios de determinação de características hídricas de diversos materiais porosos de construção.

Os procedimentos de ensaio têm origem em normas europeias publicadas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), em normas da organização norte-americana ASTM International, e num documento da Comissão 25 - PEM (Protection et érosion des monuments) [53] da RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions). No documento da RILEM são estabelecidos, na forma de recomendações provisórias, procedimentos de ensaio para

medir a alteração ou deterioração de pedras e para avaliar a eficácia dos métodos de tratamento.

Para além dos procedimentos de ensaio, também são apresentadas as formas de calcular as diversas características hídricas usando os resultados obtidos nos ensaios.

4.1.1 Procedimentos de ensaio de imersão de provetes

Apresentam-se e analisam-se os procedimentos de ensaio que envolvem a imersão de provetes para determinar as características hídricas de materiais porosos de construção.

Foi considerada a imersão em água fria à pressão atmosférica, a imersão em água em ebulição à pressão atmosférica e a imersão em água sob vácuo. A imersão também é realizada durante a operação de pesagem hidrostática.

Imersão em água fria à pressão atmosférica

A absorção de água das telhas cerâmicas em Portugal era obtida, segundo o estabelecido na norma portuguesa NP 499:1968 [54], a partir da massa das telhas secas e da massa após imersão em água fria durante 48 horas. Esta norma foi anulada e substituída pela norma europeia EN 539-2:2006, cuja versão portuguesa é a NP EN 539-2:2007 [14] e que se refere aos ensaios de resistência ao gelo.

A NP EN 539-2:2007 especifica cinco métodos de ensaio para a determinação da resistência ao gelo de telhas e acessórios cerâmicos. Cada um dos primeiros quatro métodos é aplicável a um certo conjunto de países, de acordo com o Anexo C da NP EN 1304:2007 [6], sendo esta norma relativa às definições e especificações das telhas cerâmicas e acessórios. O quinto método (método único europeu) é aplicável em todos os países membros do CEN.

O método de determinação e cálculo da absorção de água é tratado no Anexo A da NP EN 539-2. As telhas são secas durante 24 horas a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e após arrefecimento são pesadas (massa seca, m_{tr}). As telhas são colocadas na posição vertical e a imersão em água é feita gradualmente. Como apresentado na Figura 16, o nível da água é estabelecido a $\frac{1}{4}$ da altura da telha, passada uma hora o nível é elevado para $\frac{1}{2}$ da altura, passada outra hora é elevado para $\frac{3}{4}$ da altura e passada outra hora o nível é elevado para (20 ± 5) mm acima dos provetes. As telhas são mantidas submersas durante mais 48 horas, após o que são retiradas da água, é removida a água superficial e são pesadas (massa húmida, $m_{n,u}$). Calcula-se a absorção de água (W_u) a partir das massas seca e húmida.

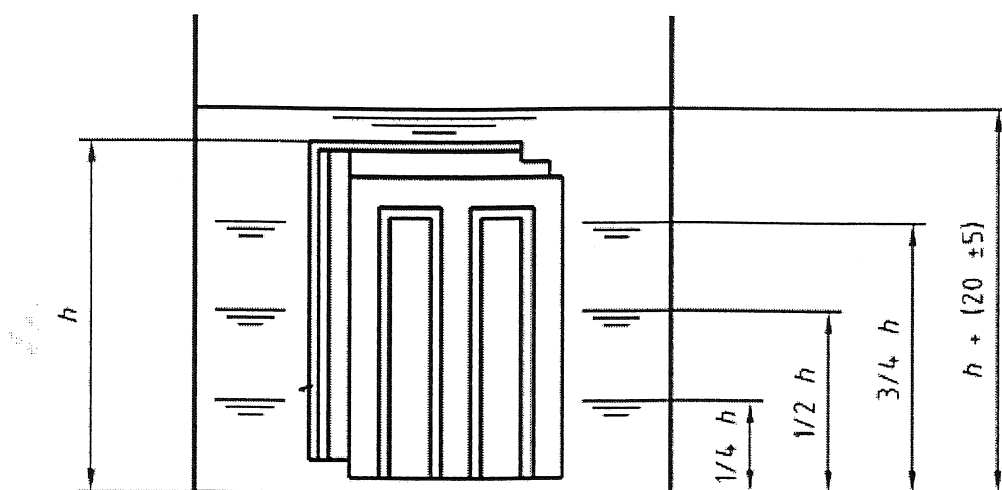


Figura 16 - Determinação da absorção de água [14]

A absorção de água obtida a partir deste procedimento de ensaio é utilizada para caracterizar e seleccionar os provetes para o ensaio, segundo o método B, de determinação da resistência ao gelo de telhas e acessórios cerâmicos. Este método B é aplicável nos países indicados no Anexo C da NP EN 1304:2007: Alemanha, Áustria, Dinamarca, Finlândia, Hungria, Islândia, Noruega, República Checa, Suécia e Suíça.

Nos cinco métodos de ensaio os provetes são sujeitos a saturação com água antes da realização dos ciclos de gelo-degelo. No método de ensaio E (método único europeu) a saturação dos provetes é obtida também por imersão gradual dos provetes, no entanto o nível da água é aumentado de cada vez apenas $\frac{1}{5}$ da altura dos provetes, é mantido nesse

nível durante 24 horas e a última fase, em que o nível da água está 50 mm acima dos provetes, dura 72 horas. Os provetes ficam portanto em contacto com a água durante 8 dias. No fim é calculada a absorção de água, que neste caso é após saturação dos provetes.

Para os tijolos cerâmicos para alvenaria a NP EN 771-1: 2006 [55] especifica que o produtor deve declarar o valor da absorção de água dos tijolos cerâmicos que sejam do tipo HD e destinados a utilização em elementos externos com a face do tijolo exposta. A absorção é calculada após imersão em água fria à pressão atmosférica durante 24 horas, segundo o método descrito no Anexo C da norma. Nesta norma é dito que não existe relação directa entre a absorção de água e a resistência à compressão ou a durabilidade dos tijolos.

A norma norte-americana ASTM C 1167 - 03 [11], aplicável a telhas cerâmicas para coberturas, especifica a determinação da absorção de água das telhas no âmbito da avaliação indirecta da durabilidade face ao gelo. As telhas são classificadas por nível de desempenho expectável (Quadro 14), obtido a partir dos valores da absorção de água fria e do coeficiente de saturação sendo este calculado dividindo a absorção de água fria pela absorção de água em ebulição. As absorções de água são obtidas segundo a norma norte-americana ASTM C 67 - 05 [56], que estabelece para a determinação da absorção de água fria que os provetes estejam imersos durante 24 horas.

Na determinação da absorção de água à pressão atmosférica segundo o procedimento da norma NP EN 13755:2005 [57], aplicável a pedra natural, os provetes são gradualmente imersos em água. No início da imersão o nível da água é colocado a metade da altura dos provetes, passada uma hora o nível é elevado para $\frac{3}{4}$ da altura e passada outra hora o nível é elevado até (25 ± 5) mm acima do topo dos provetes. Passadas 48 horas do início da imersão os provetes são retirados da água, limpos com um pano húmido e pesados. Neste procedimento os provetes voltam a ser imersos e pesados a cada 24 horas até atingirem massa constante. A absorção de água é calculada a partir da massa seca dos provetes e da massa obtida na última pesagem após imersão.

No ensaio RILEM 25 - PEM - II.1 [53], aplicável a pedras e a outros materiais porosos, os provetes são imersos em água fria à pressão atmosférica durante 48 horas após o que são limpos com um pano húmido e pesados ao ar. O volume de água absorvido nestas condições é considerado como a capacidade natural de um provete absorver água. Com esta massa após 48 horas de imersão, a massa do provete seco e a massa do provete saturado por imersão em água sob vácuo determina-se o coeficiente de saturação.

Para a determinação da absorção de água de produtos de pedra reconstituída (Agglomerated stone) a EN 14617-1:2005 [58] estabelece a imersão dos provetes e a pesagem após 1 hora, 8 horas e 24 horas do início do ensaio. Em seguida os provetes são de novo imersos e pesados de 24 horas em 24 horas até que a sua massa estabilize, o que se considera atingido quando a variação de massa dos provetes em 3 pesagens sucessivas for inferior a 0,1 %. A absorção de água é calculada a partir da massa seca dos provetes e da massa obtida na última pesagem após imersão. Utilizando também a massa do provete imerso obtém-se a massa volúmica aparente.

A norma EN 1015-10:1999 [59], aplicável a argamassas para alvenaria, estabelece que os provetes sejam imersos em água durante o tempo necessário até que em duas pesagens consecutivas, com intervalo de 15 minutos, a sua massa não varie mais do que 0,2 %. Após estabilização da massa os provetes são limpos com pano húmido para retirar o excesso de água superficial e pesados. A seguir é determinada a massa dos provetes imersos usando uma balança hidrostática. Os valores obtidos são usados no cálculo da massa volúmica aparente.

Os documentos analisados estabelecem procedimentos diferentes, aplicáveis a vários tipos de materiais porosos. Os resultados obtidos são também usados para calcular várias características.

Imersão em água em ebulição à pressão atmosférica

A imersão dos materiais porosos em água em ebulição ou em água fria sob vácuo permite obter um maior preenchimento dos espaços acessíveis à água, face à imersão em água fria

à pressão atmosférica. A documentação analisada determina para uns materiais a imersão em água em ebulição e para outros materiais a imersão em água sob vácuo para o cálculo de certas características. Também existem documentos que estabelecem a realização dos dois tipos de imersão. A seguir são apresentadas as condições e os objectivos com que é prevista nos documentos analisados a imersão em água em ebulição.

Na norma norte-americana ASTM C 1167 - 03 [11], aplicável a telhas cerâmicas para coberturas, a absorção por imersão em água em ebulição é utilizada para o cálculo do coeficiente de saturação, definido neste caso como a relação entre a absorção de água fria e a absorção após imersão em água em ebulição. As absorções de água são obtidas segundo a norma norte-americana ASTM C 67 - 05 [56]. Esta norma estabelece que os provetes após imersão durante 24 horas em água fria sejam pesados para a determinação da absorção de água fria. Em seguida são novamente colocados dentro de água que deve ser aquecida até ebulição, a atingir após 1 hora. Os provetes devem permanecer dentro de água em ebulição durante mais 5 horas, após o que são pesados para a determinação da absorção de água em ebulição. A partir do coeficiente de saturação e da absorção de água fria as telhas são classificadas por nível de desempenho expectável (Quadro 14), no âmbito da avaliação indirecta da durabilidade face ao gelo.

A norma NP EN 771-1: 2006 [55], aplicável a tijolos cerâmicos para alvenaria, especifica para tijolos cerâmicos do tipo HD, que tenham a função de corte de capilaridade, que o produtor deve declarar o valor da absorção de água por imersão em água em ebulição, determinada segundo o método descrito na NP EN 772-7: 2000 [60]. A absorção é calculada após imersão dos provetes em água que é aquecida até ao ponto de ebulição em aproximadamente uma hora. Os provetes são mantidos em água em ebulição durante mais 5 horas. A NP EN 771-1 refere que não existe relação directa entre a absorção de água e a resistência à compressão ou a durabilidade dos tijolos.

No caso dos pavimentos e revestimentos cerâmicos, na NP EN ISO 10545-3:2001 [61] é referido que há duas formas de realizar a impregnação com água dos poros abertos das amostras: por ebulição ou por imersão sob vácuo. Por ebulição serão impregnados os poros abertos mais acessíveis; o método do vácuo impregnará a quase totalidade dos poros

abertos. Esta norma estabelece que a absorção de água obtida por ebulição deve ser utilizada na classificação e caracterização dos ladrilhos. A absorção de água obtida com vácuo deve ser usada na determinação da porosidade aparente, da densidade relativa aparente e da absorção de água.

Na impregnação em água em ebulição os provetes são imersos em água que é aquecida até à ebulição e mantida em ebulição durante 2 horas, após o que é retirada a fonte de calor e os provetes são mantidos imersos a arrefecer até à temperatura ambiente durante mais 4 horas.

Imersão em água sob vácuo

Como foi referido, a imersão dos materiais porosos em água em ebulição ou em água fria sob vácuo permite obter um maior preenchimento dos espaços acessíveis à água, face à imersão em água fria à pressão atmosférica. A seguir são apresentadas as condições e os objectivos com que é prevista nos documentos analisados a imersão em água sob vácuo.

Como já foi referido, na NP EN ISO 10545-3:2001 [61], aplicável a pavimentos e revestimentos cerâmicos, é dito que há duas formas de realizar a impregnação com água dos poros abertos das amostras: por ebulição ou por imersão sob vácuo. Por ebulição serão impregnados os poros abertos mais acessíveis; o método do vácuo impregnará a quase totalidade dos poros abertos. Esta norma estabelece que a absorção obtida com vácuo deve ser usada na determinação da porosidade aparente, da densidade relativa aparente e da absorção de água, não devendo os valores obtidos ser utilizados para a classificação dos ladrilhos. A classificação dos ladrilhos deve ser feita com base na absorção de água em ebulição.

Na impregnação em água sob vácuo os provetes são colocados dentro da câmara de vácuo onde é estabelecido um vácuo de (10 ± 1) kPa durante 30 minutos. Em seguida, mantendo o vácuo, é introduzida água suficiente para que a superfície de água fique 5 cm acima dos provetes. O vácuo é eliminado deixando entrar ar na câmara e os provetes são deixados mergulhados mais 15 minutos.

As normas NP EN 1936:2001 [62], aplicável a pedra natural, e EN 772-4:1998 [63], aplicável a elementos de pedra natural para alvenaria, especificam a utilização da imersão em água sob vácuo para o cálculo da porosidade aberta e da massa volúmica aparente. As fases do ensaio previstas nestas normas são do mesmo tipo das estabelecidas na norma referida antes, no entanto decorrem durante mais tempo. Os provetes são inicialmente mantidos durante 24 horas numa depressão de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa, para eliminar o ar contido nos poros abertos. É introduzida água no recipiente, até que os provetes fiquem completamente submersos, e mantida a depressão durante o enchimento e nas 24 horas subsequentes. De seguida a pressão no recipiente é aumentada até à pressão atmosférica normal e os provetes permanecem imersos a esta pressão durante mais 24 horas. A partir da massa dos provetes secos, da massa dos provetes saturados pesados imersos e da massa dos provetes saturados pesados ao ar são calculadas a massa volúmica aparente e a porosidade aberta.

Nos procedimentos de ensaio RILEM 25 - PEM - I.1 e RILEM 25 - PEM - I.2 [53] a imersão em água sob vácuo é utilizada para a determinação da porosidade acessível à água, da massa volúmica real (da matéria impermeável) e da massa volúmica aparente. Nestes ensaios os provetes são inicialmente mantidos durante 24 horas à pressão de 2,667 kPa, para eliminar o ar contido nos poros dos provetes. Em seguida é introduzida lentamente água potável à temperatura de 15 °C a 20 °C, de modo a que os provetes só fiquem totalmente imersos ao fim de pelo menos 15 minutos. A pressão é mantida durante 24 horas e em seguida é aumentada para a pressão atmosférica sendo os provetes mantidos imersos nestas condições por mais 24 horas.

A norma EN 993-1:1995 [64], aplicável a produtos refractários, estabelece a utilização da saturação sob vácuo para o cálculo da massa volúmica aparente e da porosidade aberta. Os provetes são mantidos durante 15 minutos a 2,5 kPa, em seguida é introduzida água no recipiente de modo a que após 3 minutos a superfície líquida atinja 20 mm acima dos provetes. A pressão é mantida durante mais 30 minutos, ao fim dos quais se desliga a bomba de vácuo e se abre o recipiente. Os provetes permanecem imersos em água à pressão atmosférica durante mais 30 minutos.

Pesagem hidrostática

Na pesagem hidrostática determina-se a massa dos provetes enquanto imersos em água. Após pesagem retira-se o provete, limpa-se o excesso de água da superfície com um pano húmido e pesa-se, agora ao ar. O volume do provete obtém-se pelo quociente da diferença entre as duas massas pela massa volúmica da água. Com a massa do provete seco, a massa do provete imerso, e a massa do provete após ser retirado da água, calculam-se a massa volúmica aparente e a porosidade aberta dos provetes.

Na normalização aplicável a telhas cerâmicas a pesagem hidrostática é usada para determinar a massa volúmica das telhas no âmbito do método B de determinação da resistência ao gelo. O procedimento de ensaio está no Anexo B da NP EN 539-2:2007 [14] e estabelece que as telhas, após secagem e arrefecimento, sejam mergulhadas em água e que a sua massa seja determinada logo que se atinjam as condições de equilíbrio, quando a variação de massa for inferior a 0,1 % por minuto.

Nos tijolos cerâmicos para alvenaria a pesagem hidrostática é usada para a determinação do volume líquido e da percentagem de furação (NP EN 772-3:2000 [65]) e para a determinação da massa volúmica real seca (NP EN 772-13:2002 [66]). Os provetes são imersos em água durante pelo menos 1 hora e aí mantidos até que as massas aparentes, medidas por duas pesagens sucessivas em intervalos de 30 minutos, difiram menos de 0,2 %. Retira-se o provete da água e anota-se o resultado da segunda pesagem como a massa do provete imerso.

Na NP EN ISO 10545-3:2001 [61], aplicável a pavimentos e revestimentos cerâmicos, a pesagem hidrostática é realizada após os provetes serem impregnados com água sob vácuo, ficando assim preenchidos com água a quase totalidade dos poros abertos. O valor obtido é utilizado no cálculo da porosidade aparente, da densidade relativa aparente e da massa volúmica global.

Nas normas NP EN 1936:2001 [62] e EN 772-4:1998 [63] e nos procedimentos de ensaio RILEM 25 - PEM - I.1 e RILEM 25 - PEM - I.2 [53], aplicáveis a pedras naturais, a

pesagem hidrostática é realizada após os provetes serem impregnados com água sob vácuo, para o cálculo da porosidade aberta, da massa volúmica aparente e da massa volúmica real (da matéria impermeável).

Nos produtos de pedra reconstituída a pesagem hidrostática é realizada após imersão em água fria à pressão atmosférica durante o tempo necessário à estabilização da massa (EN 14617-1:2005 [58]). O valor obtido é utilizado para o cálculo da massa volúmica aparente.

A norma EN 993-1:1995 [64], aplicável a produtos refractários, estabelece que a pesagem hidrostática seja realizada após saturação dos provetes por imersão em água sob vácuo. O valor obtido é utilizado no cálculo da massa volúmica aparente e da porosidade aberta.

Nas argamassas para alvenaria a pesagem hidrostática é realizada após imersão em água fria durante o tempo necessário à estabilização da massa (EN 1015-10:1999 [59]). O valor obtido é utilizado no cálculo da massa volúmica aparente.

Em todos os documentos a pesagem hidrostática é realizada após imersão, para impregnação dos provetes. Essa impregnação pode ser obtida por imersão em água fria à pressão atmosférica, em água sob vácuo ou em água em ebulição. A duração dos períodos de imersão varia consoante os documentos e os materiais a que dizem respeito.

4.1.2 Características hídricas de materiais porosos de construção

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de imersão descritos é possível calcular diversas características hídricas dos materiais porosos de construção, utilizando as fórmulas apresentadas a seguir. Também são descritos os procedimentos de ensaio e os respectivos métodos de cálculo das restantes características hídricas.

São apresentados também o campo de aplicação dos ensaios e os objectivos com que são determinadas as características hídricas, tal como estabelecido nos diversos documentos normativos e afins analisados.

Absorção por imersão em água fria à pressão atmosférica

A absorção por imersão em água fria (W_u) é calculada a partir da massa do provete seco (m_{tr}) e da massa húmida após imersão ($m_{n,u}$), usando a fórmula seguinte:

$$W_u = (m_{n,u} - m_{tr}) \times 100 / m_{tr} \quad [\%]$$

Na campanha experimental do trabalho a absorção por imersão em água fria à pressão atmosférica é determinada após imersão dos provetes durante 48 horas, com um procedimento baseado no Anexo A da NP EN 539-2 [14], e descrito em 4.1.1. Devido ao tipo de provetes utilizados foi necessário introduzir adaptações ao procedimento, que serão apresentadas no Capítulo 5.

No âmbito da normalização europeia o valor da absorção obtido é utilizado para caracterizar e seleccionar os provetes para o ensaio de determinação da resistência ao gelo de telhas e acessórios cerâmicos segundo o método B, conforme estabelecido na mesma norma NP EN 539-2.

Tendo em conta os documentos e métodos de ensaio de imersão em água fria apresentados em 4.1.1, foi escolhido este método para cálculo da absorção de água por ser o único especificado em normas europeias aplicáveis a telhas cerâmicas. Assim, os valores obtidos permitem não só comparar a absorção de água dos diversos tipos de telhas utilizadas no estudo mas também comparar esses valores com a absorção de outros tipos de telhas existentes ou a conceber, já que é este o método geralmente utilizado para determinar a absorção de água das telhas.

Absorção por imersão em água em ebulição à pressão atmosférica

A absorção de água por imersão em água em ebulição (W_b) é calculada a partir da massa do provete seco (m_{tr}) e da massa do provete impregnado pelo método de ebulição (m_b), usando a seguinte fórmula:

$$W_b = (m_b - m_{tr}) \times 100 / m_{tr} \quad [\%]$$

Na campanha experimental do trabalho não foi calculada a absorção por imersão em água em ebulição à pressão atmosférica porque este método não é aplicável às telhas hidrofugadas, já que a temperatura da água em ebulição iria degradar o produto hidrofugante. A impregnação dos poros foi obtida através da imersão em água sob vácuo, e a partir daí foram calculadas várias características dos diversos provetes.

Absorção por imersão em água sob vácuo

A absorção de água por imersão em água sob vácuo (W_s) é calculada a partir da massa do provete seco (m_d) e da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s), usando a seguinte fórmula:

$$W_s = (m_s - m_d) \times 100 / m_d \quad [\%]$$

Na campanha experimental do trabalho a imersão em água sob vácuo é realizada com base no procedimento de ensaio estabelecido na NP EN 1936:2001 [62], aplicável a pedra natural e descrito em 4.1.1. Os provetes são sujeitos durante 24 horas a uma depressão de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa, a seguir é introduzida água no recipiente e os provetes permanecem as 24 horas subsequentes imersos em água à mesma depressão de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa. De seguida a pressão no recipiente é aumentada até à pressão atmosférica normal e os provetes permanecem imersos a esta pressão durante mais 24 horas.

Os provetes assim saturados por imersão em água sob vácuo são pesados imersos em água (pesagem hidrostática) e também ao ar. Com estes valores e a massa dos provetes secos calculam-se a absorção de água por imersão em água sob vácuo, a massa volúmica aparente e a porosidade aberta.

A análise dos procedimentos apresentados em 4.1.1 permite observar que todos os documentos apresentam o mesmo tipo e sequência de operações. O método seleccionado, estabelecido na NP EN 1936:2001, é semelhante ao do documento RILEM 25-PEM, e é aquele em que os períodos de imersão são mais prolongados, garantindo assim uma maior impregnação dos provetes.

Coefficiente de saturação

Quando o coeficiente de saturação (S) é considerado como a relação entre a absorção por imersão em água fria à pressão atmosférica e a absorção por imersão em água sob vácuo, o seu valor é calculado a partir da massa do provete seco antes da imersão em água fria (m_{tr}), da massa húmida após imersão em água fria ($m_{n,u}$), da massa do provete seco antes da imersão em água sob vácuo (m_d) e da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s), usando a seguinte fórmula:

$$S = 100 \times W_u / W_s = 100 \times (m_{n,u} - m_{tr}) \times m_d / ((m_s - m_d) \times m_{tr}) \quad [\%]$$

ou

$$S = 100 \times W_u / W_s = 100 \times (m_{n,u} - m_{tr}) / (m_s - m_d) \quad [\%]$$

No ensaio 25 - PEM II.1 da Comissão 25 - PEM da RILEM [53] o coeficiente de saturação de um material poroso, também chamado de grau de impregnação relativa, é definido como o volume de água que está presente nos poros desse material após imersão completa à pressão atmosférica durante um tempo definido (48 horas) em relação ao volume total de poros acessíveis à água (volume de poros abertos, determinado após imersão em água sob vácuo).

O documento da Comissão 25 - PEM da RILEM considera que o coeficiente de saturação é a relação entre a capacidade natural de um provete absorver água e a sua porosidade aberta. Este coeficiente depende da estrutura dos poros (dimensão e distribuição de dimensões).

Segundo o mesmo documento os materiais com grande coeficiente de saturação podem ser mais susceptíveis a deterioração provocada por certos processos de alteração, e portanto o coeficiente de saturação pode dar indicações relativas à durabilidade desses materiais.

Por outro lado o documento afirma que alguns mecanismos de alteração promovem o aumento do coeficiente de saturação. Nestes casos a determinação deste coeficiente pode ser um modo indirecto de avaliar a amplitude de certos tipos de alteração.

O documento da Comissão 25 - PEM refere que o coeficiente de saturação pode complementar os resultados do ensaio de porosidade para avaliar o preenchimento dos poros em materiais impregnados. Pode também dar informação sobre a eficiência dum tratamento de estanquidade ou dum tratamento hidrófugo.

Na norma norte-americana ASTM C 1167 - 03 [11], aplicável a telhas cerâmicas para coberturas, o coeficiente de saturação é definido como a relação entre a absorção de água fria após imersão durante 24 horas e a absorção após imersão em água em ebulição durante 5 horas. A partir do coeficiente de saturação e da absorção de água fria as telhas são classificadas por nível de desempenho expectável (Quadro 14), no âmbito da avaliação indirecta da durabilidade face ao gelo.

Massa volúmica aparente, massa volúmica real, massa volúmica real da matéria impermeável

O volume aparente (V_b , mililitros) é o volume limitado pela superfície externa do provete, incluindo os vazios, e é calculado, de acordo com a NP EN 1936 [62] aplicável a pedras naturais, a partir da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s , g), da massa aparente do provete imerso em água (m_h , g), após saturação sob vácuo, e da massa volúmica da água (ρ_{rh} , kg/m³), usando a fórmula:

$$V_b = (m_s - m_h) \times 1000 / \rho_{rh} \text{ [ml]}$$

O teorema de Arquimedes afirma que um corpo mergulhado num fluido em repouso recebe da parte deste uma impulsão vertical, de baixo para cima, igual ao peso do volume de fluido deslocado.

A diferença entre a massa do provete saturado pesado ao ar e a massa aparente do provete saturado pesado imerso em água é igual à massa do volume de água deslocada pelo provete. Como o provete está saturado antes de ser imerso, o volume da água deslocada é igual ao volume limitado pela superfície externa do provete.

A massa volúmica aparente (ρ_b , kg/m³) dos provetes é o quociente entre a massa do provete seco (m_d , g) e o seu volume aparente e é calculada através da equação:

$$\rho_b = m_d \times \rho_{rh} / (m_s - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

A massa volúmica real é o quociente entre a massa do provete seco e o volume da sua parte sólida. O volume da parte sólida é a diferença entre o volume aparente do provete e o seu volume de vazios (volume de poros abertos mais o volume dos poros fechados).

Para determinar o volume da parte sólida é necessário destruir os poros fechados. Para tal o provete é reduzido a pó por moagem até que todas as partículas passem num peneiro de determinada malha. Na NP EN 1936 [62] é estabelecido que os provetes devem ser moídos até que todas as partículas passem através da malha de um peneiro de 0,063 mm.

Após secagem do provete moído até massa constante é retirada uma certa quantidade e determinado o seu volume utilizando um picnómetro ou um volumenómetro de Le Chatelier.

A massa volúmica real (ρ_r , kg/m³) é a razão entre a massa do provete seco e moído (m_e , g) e o volume de líquido deslocado pela massa m_e e é calculada por uma das seguintes equações:

- Quando é usado o picnómetro, m_1 (g) é a massa do picnómetro cheio de água e com o provete moído, m_2 (g) é a massa do picnómetro cheio de água:

$$\rho_r = m_e \times \rho_{rh} / (m_2 + m_e - m_1) \quad [\text{kg/m}^3]$$

- Quando é usado o volumenómetro de Le Chatelier, V_s (ml) é o volume do líquido deslocado pela massa m_e :

$$\rho_r = m_e \times \rho_{rh} / V_s \quad [\text{kg/m}^3]$$

Outra característica que se pode calcular a partir da massa do provete seco (m_d , g) e da massa aparente do provete imerso (m_h , g) é designada no procedimento de ensaio RILEM 25 - PEM - I.2 [53] por massa volúmica real da matéria impermeável que é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume impermeável.

O volume impermeável é o volume aparente do provete menos o volume de poros abertos, o que é equivalente ao volume da matéria sólida mais o volume dos poros fechados.

Com já se referiu o volume aparente é dado pela equação:

$$V_b = (m_s - m_h) \times 1000 / \rho_{rh} \quad [\text{ml}]$$

O volume de poros abertos (V_o , mililitros) é o volume de água introduzido no provete para que fique saturado e portanto com os poros abertos preenchidos, e é calculado, de acordo com a NP EN 1936 [62], a partir da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s , g), da massa do provete seco (m_d , g) e da massa volúmica da água (ρ_{rh} , kg/m³), usando a fórmula:

$$V_o = (m_s - m_d) \times 1000 / \rho_{rh} \quad [\text{ml}]$$

O volume impermeável do provete é obtido pela expressão:

$$V_{imp} = V_b - V_o = (m_s - m_h - m_s + m_d) \times 1000 / \rho_{rh} = (m_d - m_h) \times 1000 / \rho_{rh} \quad [\text{ml}]$$

A massa volúmica real da matéria impermeável (ρ_{imp} , kg/m³), razão entre a massa do provete seco e o seu volume impermeável, é calculada usando a fórmula:

$$\rho_{imp} = m_d \times \rho_{rh} / (m_d - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

O documento da RILEM 25 - PEM [53] refere que a massa volúmica aparente e a massa volúmica real da matéria impermeável permitem avaliar a extensão de certos tipos de

degradação e também podem avaliar até que ponto os poros foram preenchidos por um tratamento de impregnação.

Porosidade aberta, porosidade total, porosidade fechada

A porosidade aberta (p_o , %) dos provetes é a razão entre o volume dos poros abertos (V_o , ml) e o volume aparente (V_b , ml) dos provetes e é calculada, de acordo com a NP EN 1936 [62], aplicável a pedras naturais, a partir da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s , g), da massa do provete seco (m_d , g) e da massa aparente do provete imerso em água (m_h , g), após saturação sob vácuo, através da equação:

$$p_o = 100 \times (m_s - m_d) / (m_s - m_h) \quad [\%]$$

A porosidade total (p , %) é a razão entre o volume de poros (abertos e fechados) e o volume aparente do provete e é calculada, de acordo com a NP EN 1936, através a equação:

$$p = 100 \times (1/\rho_b - 1/\rho_r) / (1/\rho_b) = 100 \times (1 - \rho_b/\rho_r) \quad [\%]$$

A porosidade fechada (p_f , %) é a diferença entre a porosidade total (p , %) e a porosidade aberta (p_o , %):

$$p_f = p - p_o \quad [\%]$$

O documento da RILEM 25 - PEM - I.1 [53] refere que a porosidade é uma propriedade fundamental da pedra que pode influenciar a sua durabilidade. Muitos processos de degradação causam o aumento da porosidade, enquanto os tratamentos de impregnação que preenchem os poros devem fazer diminuir a porosidade.

No mesmo documento é afirmado que a determinação da porosidade pode ser útil para avaliar a extensão de certos tipos de degradação, para avaliar até que ponto os poros foram preenchidos por um tratamento de impregnação, para prever a durabilidade de pedras

tratadas e não tratadas e para avaliar o sucesso de um tratamento de estanquidade, pela comparação entre provetes tratados e não tratados.

Todos estas afirmações são extrapoláveis para os materiais cerâmicos, nomeadamente para as telhas cerâmicas.

Impermeabilidade

A norma europeia com exigências aplicáveis às telhas cerâmicas (NP EN 1304:2007 [6]) especifica a classificação das telhas numa de duas categorias de impermeabilidade. Essa classificação depende dos resultados do ensaio de impermeabilidade da norma NP EN 539-1:2007 [67], que estabelece dois métodos de ensaio.

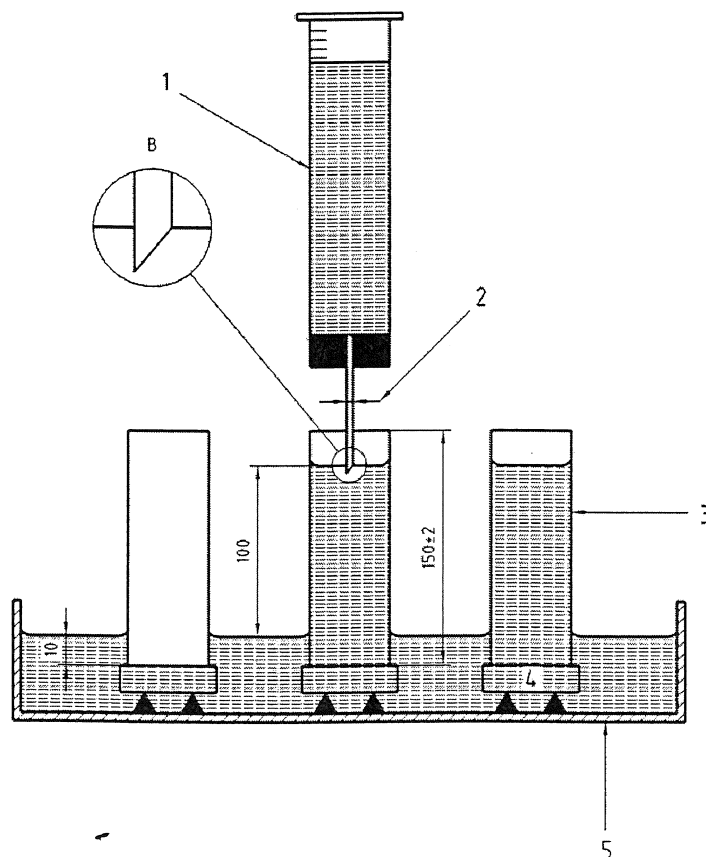
No método de ensaio 1 é determinada a quantidade de água que atravessa em 48 horas o material cerâmico da telha ou acessório por cm^2 de área superficial, sob uma carga de 10 cm de água mantida constante durante o ensaio.

Os provetes são cortados das telhas sendo as faces superior e inferior quadrados com 45 mm x 45 mm ou círculos com diâmetro de 50 mm. Sobre a superfície dos provetes habitualmente exposta ao tempo é colocado um tubo de vidro e o conjunto é parcialmente imerso em água de modo a que a superfície exposta do provete fique 1 cm abaixo do nível de água, situação representada no primeiro conjunto tubo-provete da Figura 17.

O provete é mantido nestas condições durante 48 horas, em que a face inferior está em contacto com a água e a face superior em contacto com o ar. Durante este período o provete absorve água por capilaridade pela face inferior, e liberta pela face superior o ar proveniente dos poros abertos que vão sendo preenchidos com água.

Decorridas as 48 horas é colocada água dentro do tubo de vidro até atingir um nível 10 cm acima do nível da água do recipiente, situação representada no conjunto central da Figura 17. O nível é mantido durante 48 h, ao fim das quais se fazem as medições para calcular o volume de água (V_1 , cm^3) que passou pelo provete durante aquele período de tempo.

O volume de água (V_2 , cm^3) que se evaporou da superfície da água no interior do tubo colocado sobre o provete é igual ao volume de água que se evaporou do conjunto tubo de referência (3) + placa de vidro (4), representado do lado direito da Figura 17.



- | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|
| 1 - Tubo de ensaio graduado ou cilindro de medição | 4 - Placa de vidro |
| 2 - Tubo de ensaio biselado com diâmetro interior de 6 mm | 5 - Tina com água |
| 3 - Tubo de referência para a evaporação | (dimensões em mm) |

Figura 17 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 1 [67]

O factor de impermeabilidade (IF) é calculado a partir dos volumes de água e da área projectada do provete (A , cm^2) pela seguinte fórmula:

$$\text{IF} = (V_1 - V_2) / (2 \times A) \quad [\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ por dia}]$$

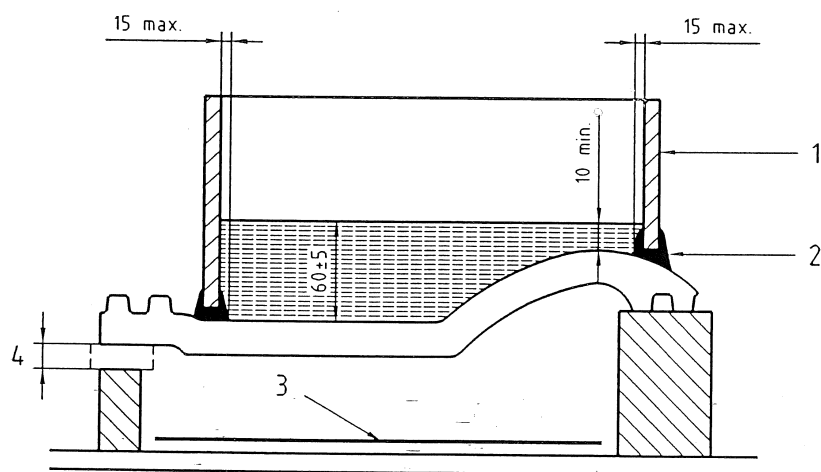
A NP EN 1304:2007 especifica para as telhas com categoria de impermeabilidade 1 que o valor médio do factor de impermeabilidade dos provetes ensaiados deve ser menor ou igual

a $0,5 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 / \text{dia}$ e que todos os resultados individuais devem ser menores ou iguais a $0,6 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 / \text{dia}$.

Para as telhas com categoria de impermeabilidade 2 o valor médio do factor de impermeabilidade dos provetes ensaiados deve ser menor ou igual a $0,8 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 / \text{dia}$ e todos os resultados individuais devem ser menores ou iguais a $0,9 \text{ cm}^3 / \text{cm}^2 / \text{dia}$.

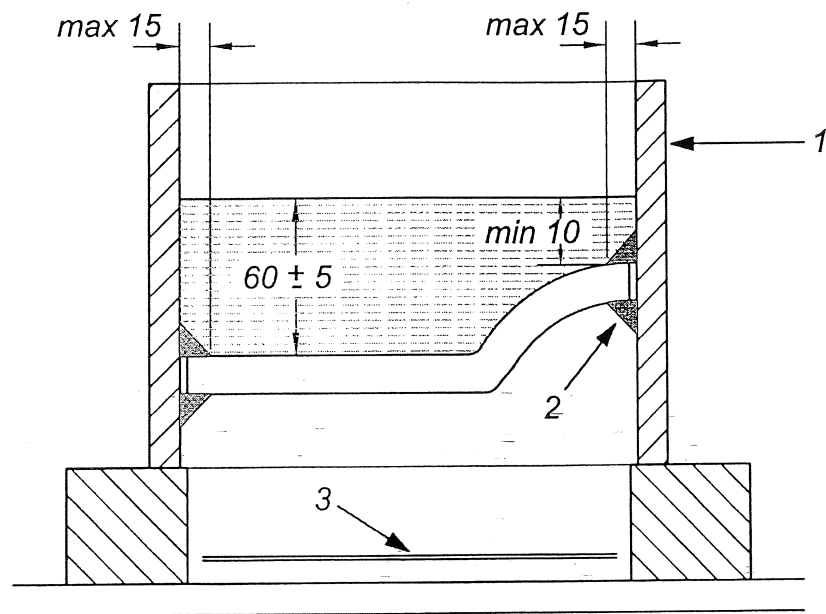
No método de ensaio 2 a permeabilidade à água de uma telha cerâmica ou acessório é obtida a partir da determinação do período de tempo decorrido até ao início da queda de gotas de água pelo tardo, depois da aplicação de água sobre a superfície da telha normalmente exposta ao tempo.

Neste método são ensaiadas as telhas inteiras. É colocada uma moldura sobre cada provete (Figura 18) ou em torno de cada provete (Figura 19), com dimensões interiores que permitam que a área de ensaio seja pelo menos 50 % da face exposta da telha e não inclua encaixes, que estão cobertos em serviço.



- | | | |
|-------------|--------------------------|-------------------|
| 1 - Moldura | 3 - Espelho | (dimensões em mm) |
| 2 - Selante | 4 - Ajustamento do nível | |

Figura 18 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 2 com moldura sobre o provete [67]



1 - Moldura 2 - Silicone 3 - Espelho ou dispositivo de medição
(dimensões em mm)

Figura 19 - Impermeabilidade. Equipamento para o método de ensaio 2 com moldura em torno do provete [67]

A junta entre a telha e a moldura é selada e o conjunto é colocado sobre apoios de modo a que a telha fique em posição horizontal ou, caso necessário, inclinada de modo a que a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo da sua superfície seja inferior a 50 mm.

No volume delimitado pela face superior da telha e pela moldura é colocada água até o nível atingir 60 mm acima do ponto mais baixo da telha. O conjunto permanece nestas condições até cair a primeira gota de água pela face inferior da telha, momento que é registado com uma exactidão de ± 15 minutos. O ensaio dura no máximo 20 horas.

O coeficiente de impermeabilidade (IC) é calculado pelas seguintes fórmulas:

$$IC X_i = \frac{20 - X_i}{20} \quad \text{e} \quad IC \bar{X}_i = \frac{20 - \bar{X}_i}{20}$$

X_i - período de tempo em horas arredondado a 0,25 horas até que a primeira gota de água caia de um provete

\bar{X}_i - tempo médio em horas arredondado a 0,25 horas até que a primeira gota de água caia de todo o lote de provetes

A NP EN 1304:2007 especifica para as telhas com categoria de impermeabilidade 1 que o valor médio do coeficiente de impermeabilidade dos provetes ensaiados deve ser menor ou igual a 0,8 (pelo menos 4 horas até à queda da primeira gota) e que todos os resultados individuais devem ser menores ou iguais a 0,85 (pelo menos 3 horas até à queda da primeira gota).

Para as telhas com categoria de impermeabilidade 2 o valor médio do coeficiente de impermeabilidade dos provetes ensaiados deve ser menor ou igual a 0,925 (pelo menos 1 h 30 min até à queda da primeira gota) e todos os resultados individuais devem ser menores ou iguais a 0,95 (pelo menos 1 hora até à queda da primeira gota).

Na norma norte-americana ASTM C 1167 - 03 [11], aplicável a telhas cerâmicas para coberturas, a impermeabilidade é avaliada submetendo a face superior das telhas, colocadas em posição horizontal, a uma altura de água de 51 mm durante 24 horas. Esta norma exige que não caiam gotas de água da face inferior das telhas durante todo o período de 24 horas.

Absorção de água a baixa pressão (método do cachimbo)

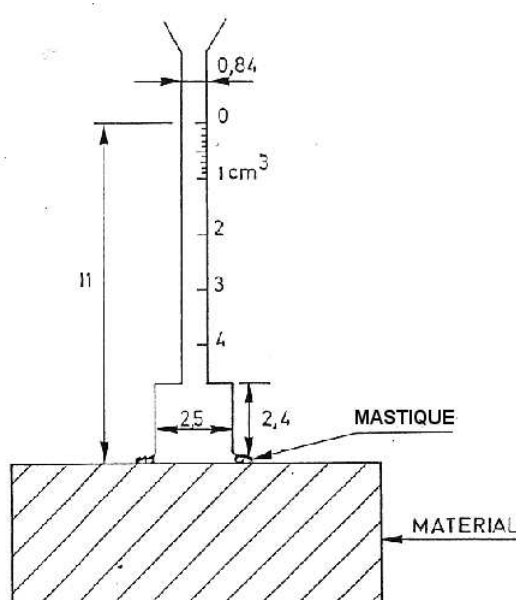
A absorção de água a baixa pressão é definida no ensaio 25 - PEM II.4 [53] da comissão 25 PEM da RILEM como o volume de água absorvido, sob baixa pressão, por uma determinada superfície do material poroso, após determinado intervalo de tempo sob a acção de uma coluna de água.

Segundo o mesmo documento o ensaio pode ser útil tanto em laboratório como *in situ* para:

- Caracterizar o material intacto e, por comparação, para avaliar as modificações superficiais ou as alterações que modificam a absorção de água ao nível da superfície.
- Caracterizar o efeito de um tratamento de impregnação ou de um tratamento que modifique a permeabilidade superficial (impermeabilização, hidrofugação).
- Caracterizar o efeito do envelhecimento natural.

- Avaliar o efeito do envelhecimento natural ou artificial de um tratamento impermeabilizante ou hidrófugo, ou de um tratamento de impregnação.
- Determinar a profundidade dum tratamento à medida que se retira material por abrasão sucessiva.

O procedimento de ensaio consiste em colocar o cachimbo representado na Figura 20 sobre a superfície a ensaiar e enchê-lo com água, após o que se lê no tubo graduado o volume de água absorvido. Os momentos de leitura dependem da porosidade do material, sendo geralmente após 5, 10, 15, 30 minutos e 1 hora. Pode-se ir adicionando água ao cachimbo de modo a manter o nível de água e, conseqüentemente, a pressão exercida pela coluna de água sobre a superfície do material.



(dimensões em centímetros e tubo graduado em cm^3)

Figura 20 - Determinação da absorção de água a baixa pressão [53]

O resultado do ensaio pode ser na forma de uma curva de absorção de água num gráfico com o tempo (minutos) em abcissa e o volume de água absorvido (cm^3) em ordenada. Pode-se comparar a quantidade de água absorvida após determinado período de tempo pela mesma zona de um material em dois estados diferentes. Esta relação deve evidenciar variações da porosidade da zona superficial do material.

Absorção de água por contacto superficial de esponja

A absorção de água por contacto é obtida utilizando uma esponja com determinado diâmetro. A esponja é molhada com um certo volume de água e em seguida é colocada sobre a superfície do provete. Após determinado intervalo de tempo a esponja é retirada e é determinada rapidamente a sua massa, sendo novamente colocada sobre o provete. Obtém-se assim a massa de água absorvida pelo provete ao fim de diversos intervalos de tempo de contacto da esponja.

Na campanha experimental do trabalho a esponja é pesada ao fim de 30 segundos, 60 segundos, 120 segundos e 180 segundos. Com estes valores são traçados os gráficos da água absorvida em função da raiz quadrada do tempo de contacto e obtidas por regressão linear as rectas que melhor se aproximam dos pontos obtidos. A partir das rectas calcula-se a água absorvida ao fim de 2 minutos de contacto.

Porosimetria por mercúrio

A determinação da porometria dos materiais através da porosimetria por intrusão de mercúrio é realizada utilizando um porosímetro e seguindo um procedimento de ensaio baseado na norma norte-americana ASTM D 4404 - 84 [68].

Uma gota de mercúrio, ao entrar em contacto com uma superfície sólida, toma uma forma aproximadamente esférica, sendo o valor do ângulo de contacto entre a gota e a superfície igual ou superior a 90° . Por esta razão o mercúrio é considerado um líquido que “não molha”. Uma gota de água em contacto com uma superfície sólida fica com uma forma “achatada” e com o valor do ângulo de contacto inferior a 90° . A água é um líquido que “molha”.

Quando os líquidos que “molham” entram em contacto com materiais porosos ocorre absorção por capilaridade. No caso dos líquidos que “não molham” não ocorre a absorção por capilaridade e só sob pressão é possível a entrada do líquido nos poros abertos, acessíveis do exterior do material.

No ensaio no porosímetro os provetes, após preparação, são sujeitos à acção de mercúrio sob pressão. A pressão vai aumentando e a cada patamar de pressão é medido o volume de mercúrio introduzido no provete. O diâmetro dos poros que vão sendo preenchidos com mercúrio é inversamente proporcional à pressão aplicada. Assim, os primeiros poros a ser preenchidos são os que têm maior diâmetro e à medida que a pressão aumenta vão sendo sucessivamente preenchidos os poros de menores diâmetros. No modelo em que se baseia este procedimento de ensaio é considerado que os poros são cilíndricos, e para cada nível de pressão de mercúrio o diâmetro aparente dos poros preenchidos é obtido pela seguinte equação [68]:

$$d = - 4 \gamma (\cos \theta) / P \quad [\text{m}]$$

d - diâmetro aparente dos poros intrudidos [m]

γ - tensão superficial do mercúrio [N/m]

θ - ângulo de contacto entre o mercúrio e a parede do poro [°]

P - pressão absoluta aplicada [Pa]

A cada nível de pressão é medido o volume de mercúrio introduzido na amostra, que é portanto o volume dos poros cujo diâmetro aparente, determinado pela equação anterior, corresponde a essa pressão.

Este ensaio permite assim obter o volume dos poros abertos da amostra e a distribuição desse volume pelos diversos diâmetros aparentes. O preenchimento dos poros vai acontecendo do exterior para o interior do provete. Poderão existir poros interiores cujo acesso ao exterior se dê apenas através de poros de dimensão inferior. Neste caso o ensaio de porosimetria de mercúrio contabilizará o volume desses poros interiores como sendo o volume de poros com o diâmetro aparente dos poros mais pequenos que lhes dão acesso.

Num estudo de materiais cerâmicos cozidos [42], realizado por vários autores, foi comparada a porosidade e a distribuição de tamanho de poros obtidos através de ensaios hídricos, da porosimetria de mercúrio e da análise digital de imagens obtidas pelo microscópio electrónico e foi concluído que a utilização de várias técnicas melhora a

caracterização do sistema poroso dos materiais. Segundo os autores, a porosimetria de mercúrio é uma boa técnica para determinar a porosidade aberta e a distribuição de poros com raio inferior a 1 μm , no entanto esta técnica subestima o teor de macroporos.

As pressões absolutas impostas e os volumes de intrusão de mercúrio por grama de material do provete permitem obter diversas informações e calcular várias características da porometria dos provetes, sendo algumas apresentadas em forma de curva em gráficos, designadamente:

- Gráfico de curvas cumulativas - Em ordenadas a percentagem do volume total de mercúrio que foi introduzido, por grama de material do provete [%] e em abcissas o raio dos poros [r , μm].
- Gráfico de curvas de distribuição dos poros - Em ordenadas a variação do volume de mercúrio introduzido (por grama de material do provete) por intervalo unitário do raio dos poros [$dV/d\log r$, cm^3/g] e em abcissas o raio dos poros [r , μm].

No ensaio RILEM 25 - PEM - I.5 [53] a distribuição do volume de poros (porometria por mercúrio) é definida como a distribuição volumétrica dos poros abertos, supostos de secção circular, segundo a sua dimensão (raio ou diâmetro), normalmente expressa em percentagem do volume total ou por unidade de massa do provete.

Segundo este documento a porometria por mercúrio permite caracterizar as pedras e estudar o comportamento diferente de pedras tratadas (com tratamentos de impregnação ou de consolidação) e de pedras não tratadas. Também pode ser útil para avaliar a extensão de certos tipos de degradação das pedras e para prever a sua durabilidade. Também é usada para a análise estrutural de pedras envelhecidas natural ou artificialmente.

4.2 Características mecânicas

As características mecânicas têm uma influência menor do que as hídricas no desempenho das telhas cerâmicas em serviço, já que a sua principal função é garantir a estanquidade das

coberturas. No entanto as telhas têm que resistir ao peso próprio e às sobrecargas a que podem estar sujeitas durante a sua vida útil e, para níveis de degradação elevados, essa capacidade pode ser afectada. Além disso, a redução das características mecânicas é um indicador de degradação.

Os principais ensaios que podem ser usados para a caracterização mecânica das telhas são:

- Determinação da velocidade de ultra-sons;
- Resistência à flexão.

Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de ultra-sons tem a grande vantagem de ser não-destrutivo, permitindo assim realizar mais ensaios e ainda fazer várias determinações sobre o mesmo provete. Permite estudar a evolução das características mecânicas durante o processo de envelhecimento e examinar o efeito do tempo em provetes expostos a envelhecimento natural ou a simulações em laboratório.

Os ultra-sons são vibrações mecânicas do tipo das vibrações sonoras, mas de frequência superior, que podem transmitir-se nos sólidos por ondas longitudinais, por ondas transversais ou por ondas de superfície [69]. As ondas longitudinais são as que se propagam com maior velocidade.

A velocidade de propagação de ultra-sons está relacionada com as características mecânicas dos materiais. O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pode ser calculado a partir da massa volúmica aparente (ρ), da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) e do coeficiente de Poisson (ν), usando a fórmula [53, 69]:

$$E_d = \rho V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu)$$

E_d - módulo de elasticidade dinâmico [Pa]

ρ - massa volúmica aparente [kg/m^3]

V_p - velocidade de propagação das ondas longitudinais [m/s]

ν - coeficiente de Poisson

Quando coeficiente de Poisson do material não for conhecido ou não se poder obter uma estimativa do seu valor, pode ser determinado por métodos dinâmicos. Este coeficiente depende da relação entre a velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) e a velocidade de propagação das ondas transversais (V_s) [53]:

$$\nu = ((V_p / V_s)^2 - 2) / (2 ((V_p / V_s) - 1))$$

No caso de um provete prismático, em que as dimensões transversais são pequenas em relação ao comprimento e em que se pode considerar a deformação transversal livre, o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pode ser calculado a partir apenas da massa volúmica aparente (ρ) e da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) [53, 69]:

$$E_d = \rho V_p^2$$

Na campanha experimental o ensaio foi realizado segundo o método de transmissão indirecta ou de superfície, descrito na norma europeia NP EN 14579 [70]. Esta norma especifica métodos de ensaio para a determinação da velocidade de propagação de impulsos de ondas longitudinais ultra-sónicas.

No método de transmissão directa os transdutores são colocados em faces opostas dos provetes (Figura 21), ficando assim o transmissor no enfiamento do receptor. No método de transmissão indirecta ou de superfície os transdutores são colocados na mesma face do provete.

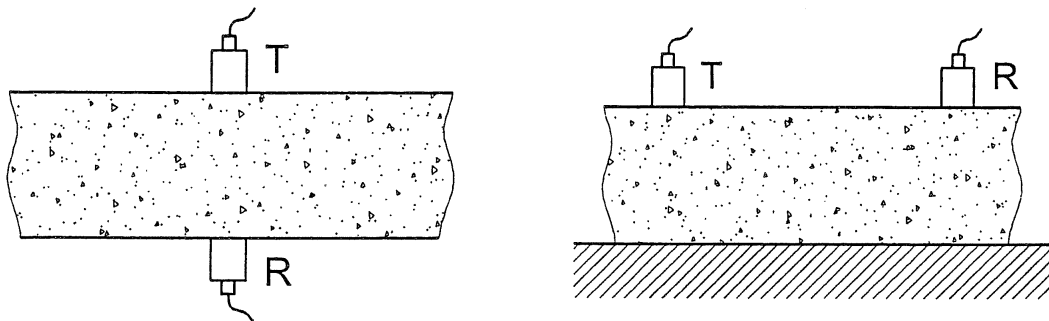


Figura 21 - Medição de velocidades de ultra-sons. Métodos de transmissão directa e de transmissão indirecta ou de superfície [70]

No método de transmissão indirecta o transmissor de ultra-sons é colocado fixo na origem (T_3 , na Figura 22) e o receptor é colocado em vários pontos (X_1, X_2, X_3, X_4) ao longo de uma linha da superfície, sendo realizadas leituras em cada ponto. A velocidade de propagação de ultra-sons é a inclinação da recta que melhor se aproxima dos pontos representativos das leituras, marcados em gráficos (distância entre transdutores, tempo).

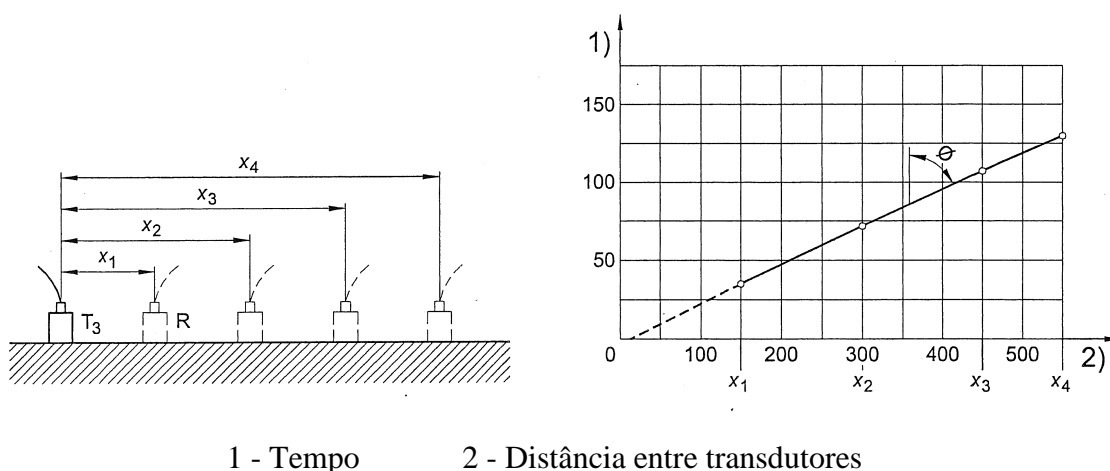


Figura 22 - Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons utilizando o método indirecto [70]

Na campanha experimental foram usados transdutores exponenciais acoplados ao equipamento modelo BP 7 da STEINKAMP. Como os transdutores são exponenciais o contacto deles com a superfície é pontual, ao contrário dos transdutores planos representados nas figuras anteriores. Por isso os transdutores foram colocados de modo a fazer um ângulo de cerca de 45° com a superfície do provete (Figura 23).

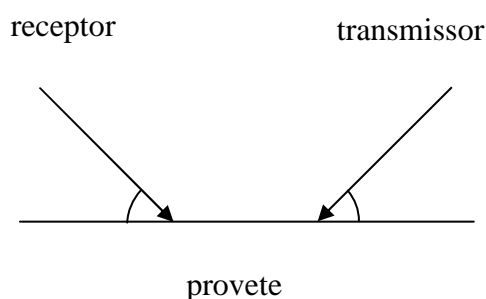


Figura 23 - Esquema de colocação dos transdutores exponenciais para medição da velocidade de propagação de ultra-sons pelo método indirecto

Os valores de velocidade de transmissão de ultra-sons foram calculados a partir dos resultados de uma série de medições realizadas com o transmissor fixo e o receptor à distância de 1 cm a 9 cm, em provetes retirados das telhas, e de 1 cm a 15 cm em telhas inteiras. Foi medido o tempo de transmissão a cada cm de afastamento dos transdutores.

Para um mesmo tipo de material a velocidade de propagação de ultra-sons depende do teor em água, do volume de poros e da estrutura porosimétrica e de outros efeitos da degradação física, como a existência de fissuras ou vazios.

Como o teor de humidade dos provetes tem influência nos resultados do ensaio, as medições foram realizadas sobre provetes secos à temperatura de 60 °C em estufa ventilada, até massa constante.

Resistência à flexão

A norma exigencial aplicável a telhas cerâmicas (NP EN 1304:2007 [6]) especifica que as telhas, quando sujeitas ao método de ensaio de determinação da resistência à flexão descrito na NP EN 538:1997 [71], suportem sem fractura uma carga de pelo menos:

- 600 N para as telhas planas
- 900 N para as telhas planas de encaixe
- 1000 N para as telhas de canudo
- 1200 N para os outros modelos de telha

4.3 Ensaio de cristalização de sais

Foram analisados vários tipos de ensaios de resistência à cristalização de sais aplicáveis a diversos materiais.

A maior parte dos procedimentos analisados são cíclicos. Em cada ciclo os provetes são sujeitos à acção de soluções salinas e em seguida a secagem. A repetição destes procedimentos sujeita o provete a ciclos de cristalização - dissolução dos sais.

Em alguns procedimentos os provetes são sujeitos continuamente e durante um grande intervalo de tempo à acção de soluções salinas.

O ataque pelas soluções salinas pode ser através da exposição a atmosferas salinas, como o nevoeiro salino, ou por imersão, total ou parcial, dos provetes em soluções salinas.

Foram analisados procedimentos de ensaio aplicáveis aos seguintes tipos de materiais:

- Pedras naturais;
- Painéis de alvenaria de blocos maciços;
- Blocos cerâmicos, de betão, de betão celular ou de pedra;
- Argamassas;
- Agregados;
- Materiais metálicos;
- Revestimentos por pintura (tintas e vernizes).

As soluções utilizadas nos diversos procedimentos analisados são as seguintes:

- Cloreto de sódio;
- Sulfato de sódio;
- Água do mar;
- Sulfato de potássio;
- Sulfato de magnésio;
- Sulfato de amónio.

Pedras naturais

Para determinação da resistência de pedras naturais ao envelhecimento por nevoeiro salino, a norma NP EN 14147:2007 [72] estabelece que os provetes são sujeitos a ciclos de nevoeiro e secagem em câmara de nevoeiro salino. O nevoeiro é obtido pela aspersão de uma solução de cloreto de sódio com concentração de (100 ± 10) g/l. Os ciclos são constituídos por 4 horas de nevoeiro e 8 horas de secagem, estando a câmara a 35 °C. Os provetes são sujeitos a 60 ciclos, ou menos se dois ou mais provetes apresentarem fendas ou se desintegrarem. Os provetes são retirados da câmara e inspeccionados visualmente a

cada quinze ciclos. Após o ensaio os provetes são dessalinizados através da imersão em água desionizada que é substituída todos os dias, até remoção dos sais. Após secagem os provetes são pesados e inspeccionados visualmente. A avaliação da degradação é expressa pela perda de massa e pelos resultados da inspeção visual.

Na campanha experimental do trabalho os provetes foram colocados numa câmara de nevoeiro salino e sujeitos a ensaios cíclicos de nevoeiro seguido de secagem. O procedimento de ensaio foi baseado no especificado na NP EN 14147:2007 [72].

No caso da determinação da resistência de pedras naturais à cristalização de sais, a norma NP EN 12370:2001 [73] estabelece ciclos de imersão total seguida de secagem em estufa. Os provetes são totalmente imersos numa solução a 14 % de sulfato de sódio decahidratado durante duas horas e de seguida secos em estufa durante pelo menos 16 horas. No início da secagem a estufa deve possuir uma atmosfera com elevada humidade relativa. Após secagem os provetes devem arrefecer até à temperatura ambiente e imersos novamente na solução de sulfato de sódio. Após 15 ciclos, ou antes, se ocorrer a rotura dos provetes, estes são imersos em água durante 24 horas, lavados cuidadosamente em água corrente e secos até massa constante. Os resultados são expressos sob a forma de percentagem de diferença de massa relativamente à massa seca inicial, ou número de ciclos até rotura, caso o provete se encontre demasiadamente desintegrado para poder ser pesado após a secagem final.

Para avaliação da resistência das pedras naturais ao envelhecimento por acção de dióxido de enxofre (SO_2) na presença de humidade, a norma NP EN 13919:2007 [74] estabelece a permanência dos provetes em atmosferas ácidas dentro de recipientes estanques. Os provetes são colocados 10 cm acima da superfície de duas soluções de ácido sulfuroso durante 21 dias. Uma solução é obtida por diluição de 500 ml de ácido sulfuroso em 150 ml de água desmineralizada ou desionizada, na outra solução a proporção é inversa: 150 ml de ácido sulfuroso em 500 ml de água desmineralizada ou desionizada. Os resultados são expressos em variação de massa e em modificações de aspecto dos provetes.

Nas recomendações da Comissão 25 - PEM da RILEM [53], aplicáveis a pedras e a outros materiais porosos, existem três ensaios para avaliação da resistência aos danos causados pela cristalização de sais.

Dois dos ensaios são constituídos por ciclos de imersão total seguida de secagem em estufa. Um é aplicável a materiais não tratados (RILEM V.1a) e o outro a materiais tratados (RILEM V.1b). No caso dos materiais não tratados os provetes são imersos em soluções a 14 % de sulfato de sódio decahidratado durante 2 horas e a seguir secos em estufa a 105 °C durante mais de 16 horas. Os materiais tratados são imersos em soluções a 10 % de sulfato de sódio durante 2 horas e a seguir secos em estufa a 60 °C durante 19 horas. Os ciclos são repetidos 15 vezes, ou menos vezes, se ocorrer a rotura dos provetes. No ensaio RILEM V.1b procede-se à remoção do sal dos provetes através de imersão durante 7 dias em água da rede renovada frequentemente. Nos dois ensaios a avaliação da degradação é expressa pela diminuição de massa dos provetes, pela variação de massa ao longo dos ciclos, pelo número de ciclos até à rotura, caso esta aconteça, e pelo registo visual e fotográfico dos tipos de degradação.

O terceiro ensaio proposto pela Comissão 25 - PEM da RILEM consiste em ciclos de imersão parcial dos provetes em soluções a 10 % de sulfato de sódio durante 2 horas seguida de secagem em estufa a 60 °C durante 19 horas. É aplicável a materiais tratados ou não tratados. Os ciclos são repetidos 15 vezes, ou menos vezes, se ocorrer a rotura dos provetes. Após os ciclos procede-se à remoção do sal dos provetes através de imersão durante 7 dias em água da rede renovada frequentemente. É referido que a alteração começa ao nível da separação solução - ar e é sempre maior nesta zona. Este teste é apropriado para avaliação visual (fotográfica) das alterações, sendo menos apropriado do que RILEM V.1a e RILEM V.1b para avaliar a perda de massa dos provetes.

Painéis de alvenaria de blocos maciços

O comité técnico TC 127-MS da RILEM (Tests for masonry materials and structures) [75] elaborou recomendações com procedimentos de ensaio para avaliar a resistência de diversos materiais constituintes das alvenarias.

A recomendação TC127-MS-A.1 (Determination of the resistance of wallties against sulphates and chlorides) especifica um método para avaliar a resistência de painéis de alvenaria aos danos causados por sulfatos e cloretos. Os provetes são constituídos por blocos para alvenaria maciços e juntas de argamassa e devem ser representativos do tipo de alvenaria considerado. São utilizadas soluções de sulfato de sódio ou de cloreto de sódio com concentração de 10 % (m/m) de um dos reagentes na forma anidra dissolvido em água pura.

Após preparação os provetes são parcialmente imersos na solução escolhida durante 24 horas. De seguida são colocados em recipientes secos de modo a que apenas a face de ensaio fique exposta e são assim deixados numa sala fechada fracamente ventilada e a 20 °C e 50 % HR. Passadas quatro semanas as faces expostas são examinadas e fotografadas, os provetes são pesados e são retiradas as partículas soltas. Se necessário volta-se a fotografar e a descrever os danos e pesam-se novamente os provetes. Por fim é colocada água desmineralizada no recipiente até meia espessura dos provetes. A exposição em sala nas condições referidas continua enquanto ocorrer degradação e a cada 4 semanas repetem-se as operações de observação, pesagem e limpeza dos provetes e é reposto o nível da água desmineralizada. O ensaio pode decorrer durante vários meses.

Os resultados do ensaio são expressos pela descrição das alterações observadas ao longo do tempo nos blocos de alvenaria e nas juntas, pela evolução da massa dos provetes e pela menção ao momento em que se considera que ocorreu a falência dos provetes.

Blocos cerâmicos, de betão, de betão celular ou de pedra

A recomendação TC127-MS-A.2 (Uni-directional salt crystallization test for masonry units) especifica um método para avaliar a resistência de blocos para alvenaria aos danos causados pela cristalização de sais solúveis sob a superfície (criptoflorescências). Os provetes podem ser cerâmicos, de betão, de betão celular ou de pedra.

Os provetes podem ser blocos inteiros ou paralelepípedos extraídos dos blocos. A face de ensaio, na proximidade da qual ocorrerá a cristalização dos sais, deve ser a face do provete

correspondente àquela do bloco que em obra ficará à vista. As quatro faces do provete perpendiculares à face de ensaio devem ser seladas de modo a impedir a evaporação através delas.

O ensaio é constituído por ciclos de imersão parcial dos provetes seguida de secagem em câmara climática. A imersão parcial decorre durante 2 horas. Os provetes são colocados na vertical, com a face de ensaio voltada para cima e a face de absorção, oposta àquela, voltada para baixo e imersa, cerca de 2 mm, numa solução saturada de sulfato de sódio (Na_2SO_4). A secagem decorre durante 4 horas numa câmara climática a 20 °C e 50 % HR.

No decorrer do ensaio a solução é absorvida pela face inferior durante a imersão e durante a secagem acontece a evaporação através da face superior. As condições de secagem são de modo a que a interface líquido-vapor, zona onde ocorrerá a cristalização dos sais, se localize abaixo da face de ensaio.

Os ciclos são repetidos até aparecer o primeiro dano, e continuam para avaliar a progressão dos danos e o comportamento das camadas subsequentes.

Os resultados do ensaio são expressos pelo número de ciclos decorridos, pela descrição das alterações observadas ao longo do tempo e, caso seja exigido, pela definição do que se considera ser o estado de falência do provete e pelo número de ciclos decorridos até esse momento.

Argamassas

A recomendação TC127-MS-A.4 (Determination of the durability of hardened mortar) especifica um método para avaliar a resistência de argamassas para alvenaria aos danos causados por gelo/degelo, pelo ataque de sulfatos ou pela combinação de ambos. O método é aplicável a argamassas para alvenaria contendo ligantes minerais e agregados normais ou leves.

O ensaio é realizado sobre três provetes, sendo o primeiro sujeito a ciclos de absorção por capilaridade duma solução de sulfato de potássio seguida de secagem. O segundo provete é sujeito à acção de gelo/degelo integrada nos ciclos após a fase de absorção da solução de sulfato de potássio e antes da secagem. O terceiro provete é sujeito apenas a ciclos constituídos por absorção de água seguida da acção de gelo/degelo e de secagem.

Após a execução ou obtenção e o condicionamento dos provetes, estes são colocados durante 20 minutos com a face de ensaio voltada para cima e a face oposta parcialmente imersa numa solução de sulfato de potássio a 36,25 g/l (provetes 1 e 2) e em água (provetes 3). Durante este período de tempo os provetes absorvem por capilaridade o líquido com que estão em contacto.

A seguir os provetes são colocados dentro de uma caixa, que contém 5 ml de água para que a saturação do provete atinja um nível superior, e são rodeados de material isolante de modo a que apenas a face de ensaio fique exposta. As caixas são colocadas em tabuleiros envoltos em película estanque para que não ocorra perda de humidade pela face exposta da argamassa. Os tabuleiros são colocados em laboratório durante 2 a 3 dias. Nas últimas 5 horas deste período os provetes 2 e 3 são colocados a -15 °C, após o que são colocados à temperatura ambiente durante cerca de 30 minutos para que aconteça o degelo.

Depois de todos os provetes serem retirados das caixas são inspeccionados para detectar degradações. Por fim são colocados noutras caixas secas, rodeados também de material isolante e apenas com a face de ensaio exposta. Os provetes são assim colocados a secar numa estufa a (25 ± 2) °C durante 24 horas.

Os ciclos são repetidos 25 vezes, à razão de 2 por semana. A cada ciclo é realizada uma inspecção visual para detectar perdas de material e fissuração. Se a perda de material atingir 50 % da área lateral do provete retirá-lo do ensaio e registar o número de ciclos concluídos. Após 25 ciclos avaliar visualmente a perda de material de cada provete e classificá-la de 1 (50 % de área perdida) a 10 (0 % de área perdida).

Os resultados do ensaio são expressos pela classificação decorrente da perda de material observada, pela descrição do comportamento global de cada provete, pela descrição do tipo de degradação ocorrida e pelo número de ciclos concluídos.

Agregados

Foram analisados três documentos para avaliação do comportamento de agregados sob a acção dos sulfatos.

A especificação LNEC 251 - 1985 [76] (Inertes para argamassas e betões. Ensaio de reactividade com os sulfatos em presença de hidróxido de cálcio) permite avaliar a reactividade com os sulfatos, em presença de hidróxido de cálcio, dos agregados para argamassas e betões. Os provetes permanecem em imersão total dentro de tinas com tampa numa sala à temperatura de (18 a 25) °C durante 6 meses ou mais, sendo os banhos renovados periodicamente.

Os provetes podem ser prismas cortados da rocha de onde são extraídos os agregados ou prismas de argamassa preparada com o agregado a ensaiar. Os prismas de rocha são imersos numa solução de sulfato de sódio ou em água do mar filtrada, ambas saturadas de hidróxido de cálcio. Os prismas de argamassa são imersos em água do mar filtrada.

Os provetes são medidos periodicamente e observados cuidadosamente, a fim de detectar o início de fendilhação e acompanhar a sua evolução.

Os resultados são expressos pela extensão sofrida pelos provetes ao longo do tempo, pela menção à ocorrência ou não de fendilhação e, em caso afirmativo, pela indicação do momento em que se iniciou.

Os outros dois documentos relacionados com agregados especificam que os provetes são sujeitos a ciclos de imersão total seguida de secagem em estufa.

Na norma NP EN 1367-2:2002 [77] (Ensaio das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados. Parte 2: Ensaio do sulfato de magnésio) é avaliado o comportamento de agregados sujeitos à acção cíclica de cristalização e rehidratação de sulfato de magnésio no interior dos poros. Os agregados são colocados em cestos e imersos numa solução saturada de sulfato de magnésio dentro de recipientes tapados para evitar evaporação. Após 17 horas de imersão os cestos são retirados e deixados a escorrer durante 2 horas. De seguida são colocados a secar em estufa a 110 °C durante 24 horas após o que arrefecem em exsiccador durante 5 horas. Os provetes são sujeitos a 5 ciclos, após o que são lavados em água corrente, até que a água de lavagem não contenha sulfato de magnésio. Por fim são secos em estufa a (110 ± 5) °C durante (24 ± 1) horas e deixados arrefecer. A resistência ao sulfato de magnésio é calculada a partir da quantidade de material com dimensão inferior a 10 mm criado pelo ensaio e expressa em percentagem da massa inicial do provete.

A norma norte-americana ASTM C88-99a [78] (Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate) permite determinar a alteração sofrida por agregados quando submetidos alternadamente a imersões numa solução saturada de sulfato de sódio ou de sulfato de magnésio e a secagens em estufa. Os provetes são totalmente imersos num dos tipos de soluções durante 16 horas a 18 horas, após o que são retirados e deixados escorrer durante 15 minutos. De seguida são colocados numa estufa a 105 °C até atingirem massa constante. O tempo de secagem necessário vai aumentando e pode variar consideravelmente. Após secagem os provetes são deixados arrefecer até temperatura ambiente antes de voltarem a ser imersos. Depois da realização do número de ciclos requerido os provetes são lavados em água corrente até que a água de lavagem não contenha sulfatos. A avaliação da degradação é quantitativa, pela determinação da perda de massa, em percentagem e qualitativa, por observação visual das fracções granulométricas maiores que 19 mm e registo das alterações detectadas.

Nesta norma é referido que a força expansiva interna derivada da rehidratação do sal quando o provete volta a ser imerso simula a expansão da água quando gela.

Materiais metálicos

No caso dos materiais metálicos e dos seus revestimentos a norma ISO 9227:2006 [79] (Corrosion tests in artificial atmospheres - salt spray test) permite avaliar a resistência à corrosão provocada por nevoeiro salino neutro de materiais metálicos com ou sem protecção permanente ou temporária contra a corrosão. Os provetes são sujeitos a nebulização contínua, que pode durar 1000 horas, de uma solução com concentração de cloreto de sódio de 50 g/l, decorrendo o ensaio à temperatura de 35 °C. Este ensaio é aplicável a metais e ligas metálicas, a revestimentos metálicos e a revestimentos orgânicos (revestimentos por pintura) de materiais metálicos.

Revestimentos por pintura (tintas e vernizes)

A norma NP EN ISO 11997-1:2007 [80] (Tintas e vernizes. Determinação da resistência a condições cíclicas de corrosão. Parte 1: Molhagem (nevoeiro salino)/secagem/humidade (ISO 11997-1:2005)) estabelece procedimentos de ensaio para avaliação dos efeitos da exposição a ciclos de nevoeiro salino, secagem e humidade de revestimentos obtidos com tintas, vernizes e produtos similares. São apresentados quatro ciclos de ensaio diferentes, a que podem ser sujeitos vários tipos de produtos utilizados em diversas aplicações. São utilizadas dois tipos de soluções, uma de cloreto de sódio com concentração de 50 g/l e outra de cloreto de sódio com concentração de 0,31 g/l e sulfato de amónio com concentração de 4,1 g/l. A duração do ensaio é diferente nos 4 tipos de ciclos, variando de 28 ciclos com duração total de 168 horas a 180 ciclos com a duração de 1440 horas. A degradação é determinada pela observação da deterioração provocada e avaliada de acordo com critérios previamente combinados.

CAPÍTULO 5 ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE TELHAS CERÂMICAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

5.1 Planeamento da campanha experimental

O principal objectivo da campanha experimental é avaliar a adequabilidade de ensaios de envelhecimento artificial acelerado para o estudo da durabilidade das telhas em ambiente marítimo.

O primeiro passo para atingir esse objectivo foi estudar a possibilidade dos ensaios acelerados induzirem diferentes graus de degradação em telhas com características diferentes. Para isso foram realizados ensaios cíclicos sobre os diversos tipos de provetes e, tendo em conta o comportamento observado, modificados alguns dos parâmetros do ensaio cíclico e concebido um ensaio composto constituído por fases cíclicas intercaladas com outras operações realizadas sobre os provetes.

Os provetes foram caracterizados antes e após serem sujeitos aos ensaios acelerados para avaliar se a degradação provocada por estes ensaios se pode quantificar através de variações das suas características.

Através da caracterização dos provetes também se pretendem identificar as características das telhas que contribuem para a sua degradação em ambiente marítimo e tentar relacionar essas características com os parâmetros de fabrico.

Foram então realizados três conjuntos de ensaios: ensaios de caracterização dos provetes novos; ensaios de envelhecimento artificial acelerado em câmara de nevoeiro salino e ensaios de caracterização dos provetes após ensaio de envelhecimento acelerado.

Os provetes foram caracterizados através de análise química e mineralógica e foram também determinadas as suas características hídricas e mecânicas. Tentou-se assim determinar as suas características distintas e comparar posteriormente com as características dos provetes degradados.

Por um lado pretende-se encontrar características que possam justificar diferenças de comportamento dos provetes face aos ensaios acelerados, por outro averiguar se as características dos provetes são afectadas pelos ensaios de envelhecimento acelerado.

O estabelecimento dos parâmetros dos ensaios acelerados foi sendo realizado à medida que se foram observando os efeitos dos ensaios nos provetes e se foram obtendo resultados.

Foram realizados vários tipos de ensaios na câmara de nevoeiro salino, primeiro ensaios de nevoeiro contínuo, depois diversos ensaios cíclicos de nevoeiro/secagem e finalmente foi concebido e realizado outro tipo de ensaio designado por ensaio composto.

Os ensaios de nevoeiro contínuo foram efectuados para averiguar o comportamento hídrico dos provetes sob a acção de nevoeiro contínuo sem sal e a seguir para determinar o comportamento sob a acção de nevoeiro também contínuo, mas com sal.

Os primeiros ensaios cíclicos de nevoeiro/secagem foram constituídos por ciclos com duas durações diferentes. Os resultados obtidos permitiram seleccionar para os ensaios subsequentes os ciclos com duração mais curta.

Nos ensaios cíclicos realizados a seguir foi atingido o objectivo de obter diferentes tipos e graus de degradação em provetes diferentes. No entanto, como a degradação não atingiu nível elevado, foi decidido desenvolver um novo tipo de ensaio designado por ensaio composto.

No ensaio composto a temperatura na câmara de nevoeiro salino foi superior à temperatura durante os ensaios cíclicos anteriores. Este ensaio composto foi constituído por fases cíclicas intercaladas por fases de secagem prolongada. Também se procedeu à pincelagem a seco e à molhagem e pincelagem a húmido das superfícies dos provetes. A pincelagem a seco permitiu libertar o material degradado solto e assim simular o efeito do vento. A molhagem e pincelagem a húmido permitiram dissolver os sais que se foram acumulando à superfície e simular o efeito da chuva acompanhada de vento.

Por fim foram realizados diversos tipos de ensaios para determinar as características dos provetes envelhecidos artificialmente e comparar essas características com as características dos provetes novos.

5.2 Tipo de telhas e de provetes

Foram utilizadas telhas de dois fabricantes (F1 e F2). Do fabricante 1 foram estudados três tipos de telhas dum mesmo modelo e do fabricante 2, três tipos de telhas do modelo 1, um tipo do modelo 2 e um tipo do modelo 3:

F1 NH - fabricante 1, telhas vermelhas não hidrofugadas

F1 B - fabricante 1, telhas brancas não hidrofugadas

F1 H - fabricante 1, telhas vermelhas hidrofugadas

F2 NH - fabricante 2, modelo 1, telhas vermelhas não hidrofugadas

F2 B - fabricante 2, modelo 1, telhas brancas não hidrofugadas

F2 H - fabricante 2, modelo 1, telhas vermelhas hidrofugadas

F2 T2 NH - fabricante 2, modelo 2, telhas vermelhas não hidrofugadas

F2 T3 NH - fabricante 2, modelo 3, telhas vermelhas não hidrofugadas

Os três tipos de telhas do fabricante 1 são de um mesmo modelo, são portanto geometricamente iguais e fabricadas na mesma linha de fabrico, recorrendo à mesma tecnologia.

Como já foi referido (3.2), as telhas habitualmente designadas por telhas brancas (F1 B) são produzidas com matéria-prima que incorpora argilas calcárias, fonte de carbonato de cálcio. A matéria-prima destas telhas tem um teor de óxido de ferro inferior ao da matéria-prima das telhas vermelhas. A temperatura de cozedura das telhas brancas tem que atingir valores superiores à das telhas vermelhas para que o carbonato de cálcio dê origem ao óxido de cálcio, que por sua vez vai reagir com o ferro e atenuar assim a cor vermelha.

As telhas vermelhas hidrofugadas do fabricante 1 (F1 H) são obtidas por imersão em produto hidrofugante, à base de silicone, de telhas vermelhas não hidrofugadas (F1 NH), no final do processo de fabrico.

As telhas do fabricante 2 são de três modelos geometricamente distintos. Cada modelo é produzido numa linha de fabrico independente e utilizando tecnologia própria. A matéria-prima utilizada é genericamente a mesma para cada um dos 3 modelos de telhas vermelhas, que perfazem 4 tipos de telhas, já que as telhas hidrofugadas do fabricante 2 (F2 H), à semelhança das do fabricante 1, são telhas não hidrofugadas do modelo 1 (F2 NH) que no fim do processo de fabrico são imersas no produto hidrofugante, à base de silicone.

As telhas do outro tipo, designadas de brancas (F2 B), são produzidas na mesma linha de fabrico e com as mesmas tecnologias das telhas vermelhas do modelo 1 (F2 NH e F2 H). As telhas brancas são fabricadas com matérias-primas que incluem argilas calcárias, que têm menor teor de óxidos de ferro. A cozedura destas telhas decorre durante mais tempo e a temperatura máxima é superior às atingidas pelas restantes telhas do fabricante 2.

As telhas F2 NH, F2 B e F2 H, do modelo 1, são produzidas com molde de borracha e são empilhadas nos vagões sobre suporte refractário e ao alto. Os suportes apoiam uns nos outros e as telhas estão afastadas, o que permite a passagem de ar entre elas e também menor diferença de temperatura das telhas numa mesma secção da pilha, durante a cozedura. A cozedura das telhas vermelhas do modelo 1 (F2 NH e F2 H) atinge uma temperatura máxima superior à das telhas do modelo 2 (F2 T2 NH) e inferior às temperaturas máximas das telhas do modelo 3 (F2 T3 NH) e das telhas brancas do modelo 1 (F2 B).

As telhas F2 T2 NH, do modelo 2, são produzidas com molde de borracha. São colocadas nos vagões em conjuntos de várias telhas encostadas e fixadas por arames. Os conjuntos são empilhados ao cutelo nos vagões ficando os superiores assentes sobre os inferiores. A cozedura destas telhas atinge uma temperatura máxima inferior às das restantes telhas do fabricante 2.

As telhas F2 T3 NH, do modelo 3, são produzidas com molde de gesso, o que permite obter superfícies mais lisas e arestas mais vivas. As telhas são colocadas na horizontal sobre suportes individuais que são empilhados nos vagões apoiados uns nos outros. As telhas ficam afastadas, o que permite a passagem de maior volume de ar entre elas e portanto maior uniformidade de temperatura das telhas da mesma secção da pilha, durante a cozedura. Estas são as telhas vermelhas do fabricante 2 que atingem a maior temperatura máxima durante a cozedura.

De cada telha foram obtidos cinco provetes, por corte transversal com serra de disco (Figura 24). Para os ensaios foram usados, de preferência, os provetes C, da zona média das telhas, tendo também sido utilizados provetes B e D, todos eles com comprimento correspondente à largura das telhas e com cerca de 9 cm de largura. As faces de corte dos provetes destinados a ensaios de cristalização de sais foram seladas com uma resina epoxi.

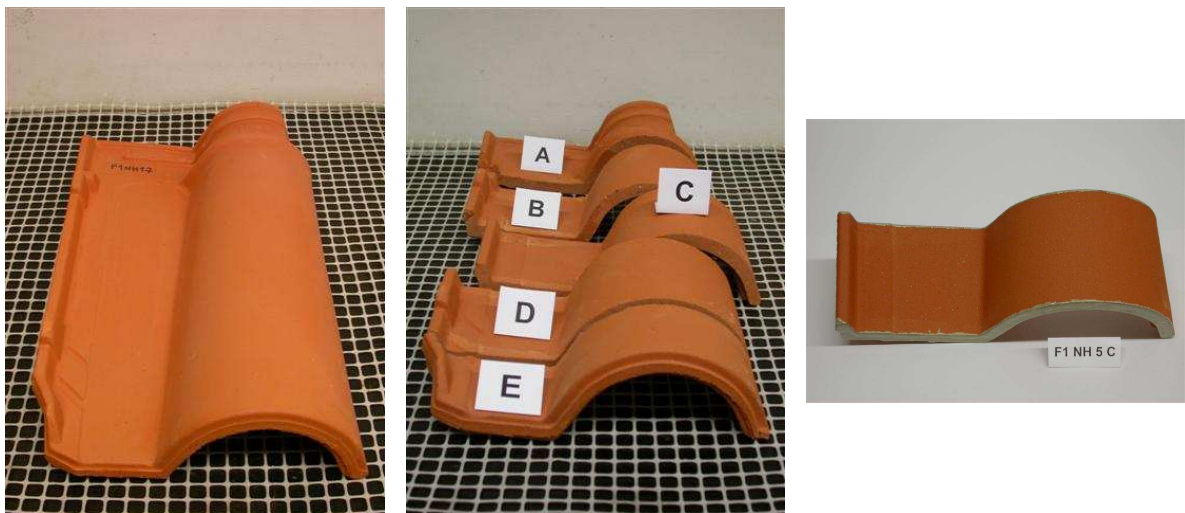


Figura 24 - Tipo de provetes ensaiados

5.3 Caracterização de provetes novos

No Capítulo 4 foram apresentados os ensaios para caracterização dos materiais porosos de construção, foi feita a sua análise crítica e a selecção dos ensaios a utilizar na campanha experimental. Neste capítulo 5.3 apresenta-se a adaptação dos ensaios à caracterização das telhas cerâmicas e dos provetes retirados delas. Também se apresentam os resultados

obtidos nos ensaios realizados sobre telhas e provetes novos.

Ensaio realizado:

- Análise química e mineralógica;
- Absorção de água fria por imersão;
- Absorção de água sob vácuo;
- Absorção de água por contacto superficial de esponja;
- Velocidade de propagação de ultra-sons - método indirecto;
- Porosimetria de mercúrio.

5.3.1 Análise química e mineralógica

Foi realizada a análise química por fluorescência de raios X (FRX) e a análise mineralógica por difractometria de raios X (DRX) dos seis tipos de material cozido. Foram retiradas amostras de telhas vermelhas e de telhas brancas do fabricante 1. Do fabricante 2 foram analisadas amostras de telhas brancas e dos três modelos de telhas vermelhas.

No Quadro 17 são apresentados os resultados da análise química por fluorescência de raios X (FRX). Os óxidos presentes em maior proporção nas amostras ensaiadas são a sílica, a alumina, o óxido de ferro e o óxido de potássio. O óxido de silício encontra-se em maior quantidade, com um teor próximo dos 70 % em todos os tipos de telhas.

Os teores de alumina variam entre 15 % e 25 %, tendo as telhas brancas valores mais elevados do que as telhas vermelhas. O óxido de alumínio é mais refractário e portanto as telhas brancas necessitam de atingir maiores temperaturas durante a cozedura.

Os teores de óxido de ferro variam entre 2 % e 7 %. As telhas brancas têm menor teor de ferro do que as vermelhas. É este o elemento que fornece a tonalidade vermelha às telhas. As telhas vermelhas do fabricante 1 têm menor teor de óxido de ferro (5,5 %) do que os diversos tipos de telhas vermelhas do fabricante 2 (7 %), o que pode explicar as diferenças de tonalidade observadas.

Quadro 17 - Análise química por fluorescência de raios X (FRX)

Determinações	Teores [%]					
	F1NH9E	F1B7E	F2NH5E	F2B5E	F2T2NH6E	F2T3NH6E
Sílica SiO_2	72,01	67,23	69,70	66,00	68,89	69,44
Alumina Al_2O_3	15,65	24,60	18,50	25,79	18,94	18,55
Óxido de ferro Fe_2O_3	5,47	2,36	6,99	2,11	7,07	7,09
Manganês MnO	0,05	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
Óxido de magnésio, MgO	1,58	0,70	0,65	0,56	0,70	0,66
Óxido de cálcio, CaO	0,08	1,07	0,22	0,53	0,20	0,19
Óxido de sódio Na_2O	0,41	0,50	0,23	0,38	0,27	0,26
Óxido de potássio, K_2O	3,19	2,01	2,24	3,18	2,25	2,22
Titânia TiO_2	0,80	0,74	1,08	0,78	1,09	1,09
Óxido de fósforo, P_2O_5	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06
Perda ao fogo	0,70	0,70	0,30	0,60	0,50	0,40

O teor de óxido de potássio é de cerca de 3 % nas telhas vermelhas do fabricante 1 e nas telhas brancas do fabricante 2 tendo as restantes amostras um teor de cerca de 2 %.

Relativamente aos restantes óxidos, presentes em menores quantidades, é de referir que as telhas brancas têm mais óxido de cálcio do que as vermelhas, atingindo o maior teor as telhas brancas do fabricante 1 com 1 %. As telhas vermelhas do fabricante 1 têm maior teor de óxido de magnésio do que as restantes telhas. Os restantes óxidos têm teores da mesma ordem de grandeza nos diversos tipos de telhas.

O maior teor de óxido de cálcio presente nas telhas brancas tem origem em argilas calcárias que são habitualmente adicionadas às restantes matérias-primas para a obtenção de barro cozido de cor amarela, constituinte das telhas designadas de brancas.

Da análise mineralógica por difractometria de raios X (DRX) dos seis tipos de material cozido obtiveram-se os difractogramas apresentados na Figura 25 à Figura 30, a partir dos quais foi estabelecida a composição mineralógica qualitativa expressa no Quadro 18. Neste quadro é indicada, de modo aproximado, a proporção relativa dos diferentes compostos cristalinos identificados: Quartzo, Feldspatos, Mulite e Hematite.

O Quartzo está presente em proporção elevada em todas as amostras. Os Feldspatos existem em maior proporção nas amostras do fabricante 1 do que nas amostras do fabricante 2. Não foi detectada Mulite na amostra da telha vermelha do fabricante 1, existindo em proporção vestigial nas telhas brancas do fabricante 1 e em proporção fraca ou vestigial nas telhas do fabricante 2. A Hematite, cuja presença proporciona a cor vermelha das telhas, foi detectada em proporção vestigial nas telhas vermelhas do fabricante 1 e em proporção vestigial ou fraca nas telhas vermelhas do fabricante 2. As diferentes proporções de Hematite são uma das causas das diversas tonalidades das telhas vermelhas.

Quadro 18 - Composição mineralógica qualitativa

Compostos Cristalinos Identificados	F1NH9E	F1B7E	F2NH5E	F2B5E	F2T2NH6E	F2T3NH6E
Quartzo	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Feldspatos	+ / +++	+ / +++	Vtg	+	+	Vtg / +
Mulite	-	Vtg	Vtg / +	Vtg / +	Vtg / +	Vtg / +
Hematite	Vtg	?	Vtg / +	?	Vtg / +	Vtg / +

Notação utilizada:

++++	- proporção muito elevada (composto predominante)	vtg	- vestígios
+++	- proporção elevada	?	- dúvidas na presença
++	- proporção média	-	- não detectado
+	- existe em fraca proporção		

Os difractogramas das telhas do fabricante 1 (Figura 25) fornecem as seguintes informações:

- A amostra de telha branca do fabricante 1 (F1 B) contém Mulite, o que não acontece com a telha vermelha (F1 NH). A presença de Mulite confirma que durante a cozedura as telhas brancas atingiram maior temperatura, necessária à decomposição das matérias-primas e à formação de Mulite.

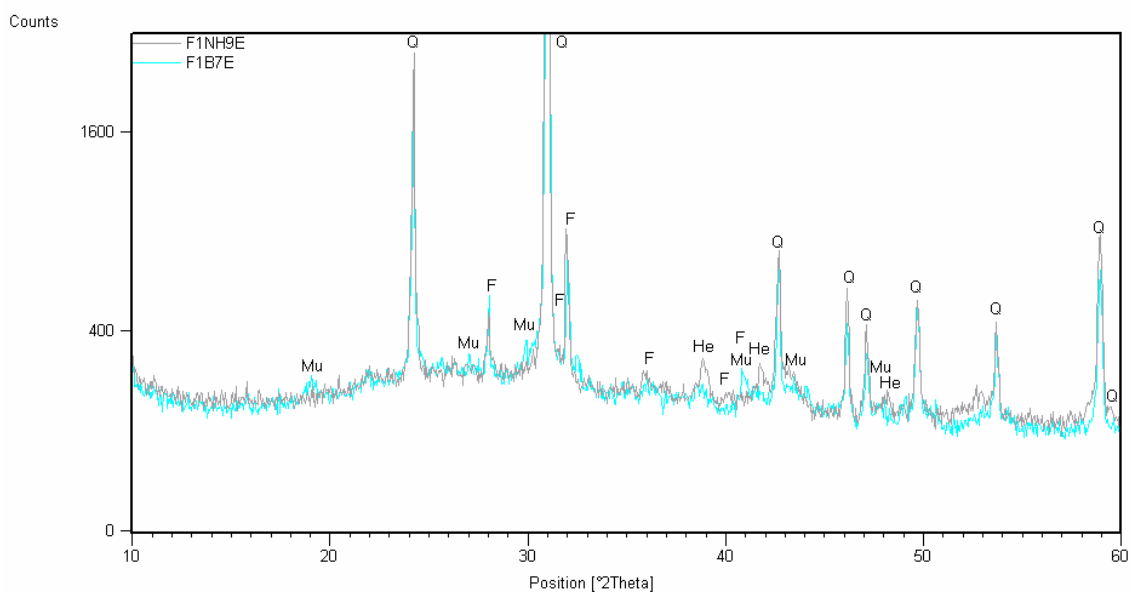


Figura 25 - Difractogramas de amostras das telhas do fabricante 1

- A telha vermelha (F1 NH) contém maior proporção de Hematite, o que lhe confere a sua tonalidade.
- As telhas vermelhas e brancas do fabricante 1 foram produzidas com matérias-primas diferentes.

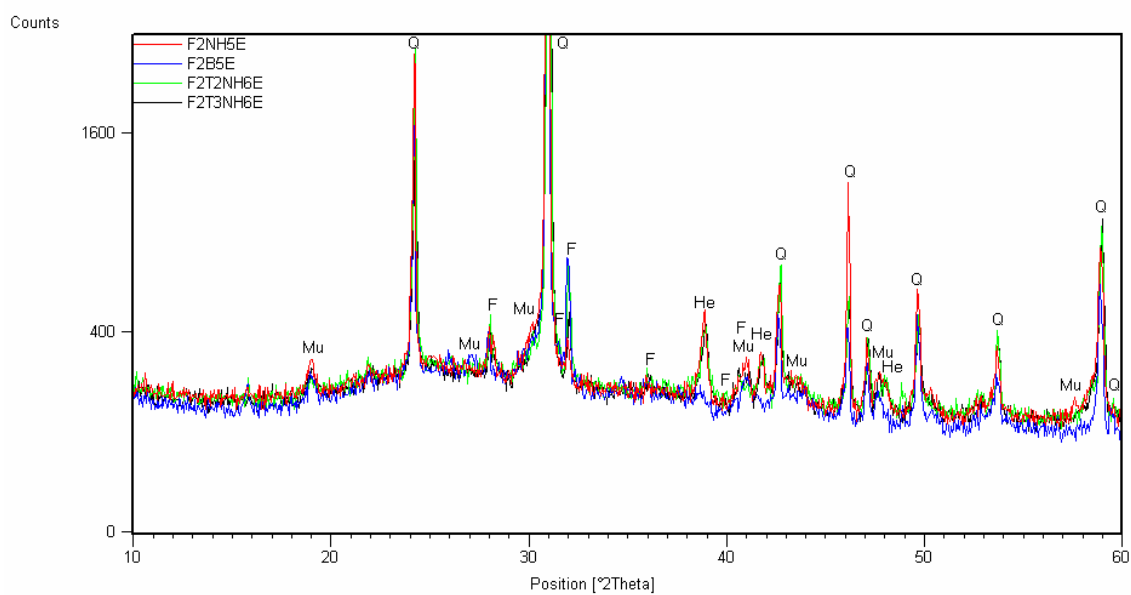


Figura 26 - Difractogramas de amostras das telhas do fabricante 2

A análise dos difractogramas de todas as telhas do fabricante 2 (Figura 26) permite afirmar o seguinte:

- Todos os provetes do fabricante 2 contêm Mulite, o que indica que terão atingido maiores temperaturas de cozedura do que as telhas vermelhas do fabricante 1, em que não foi detectada Mulite.
- Tal como as telhas do fabricante 1, também neste caso do fabricante 2 os difractogramas indicam que existem diferenças de composição das matérias-primas.

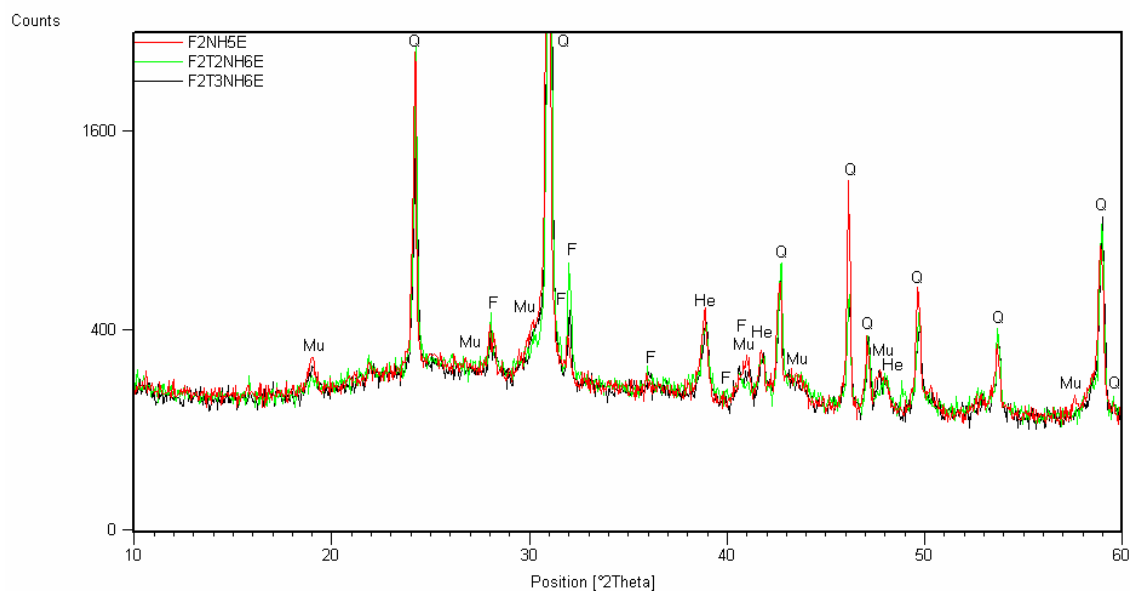


Figura 27 - Difractogramas de amostras das telhas vermelhas do fabricante 2

A Figura 27 permite comparar os difractogramas de amostras dos três modelos de telhas vermelhas do fabricante 2. As telhas F2 T2 NH têm menor proporção de Mulite, o que confirma que atingiram durante a cozedura uma temperatura máxima inferior à das telhas dos outros dois modelos, F2 NH e F2 T3 NH, que têm proporção de Mulite semelhante, o que indica que atingiram temperaturas máximas idênticas. As telhas vermelhas do modelo 2 (F2 T2 NH) têm maior proporção de Feldspatos e as do modelo 1 (F2 NH) têm menor proporção.

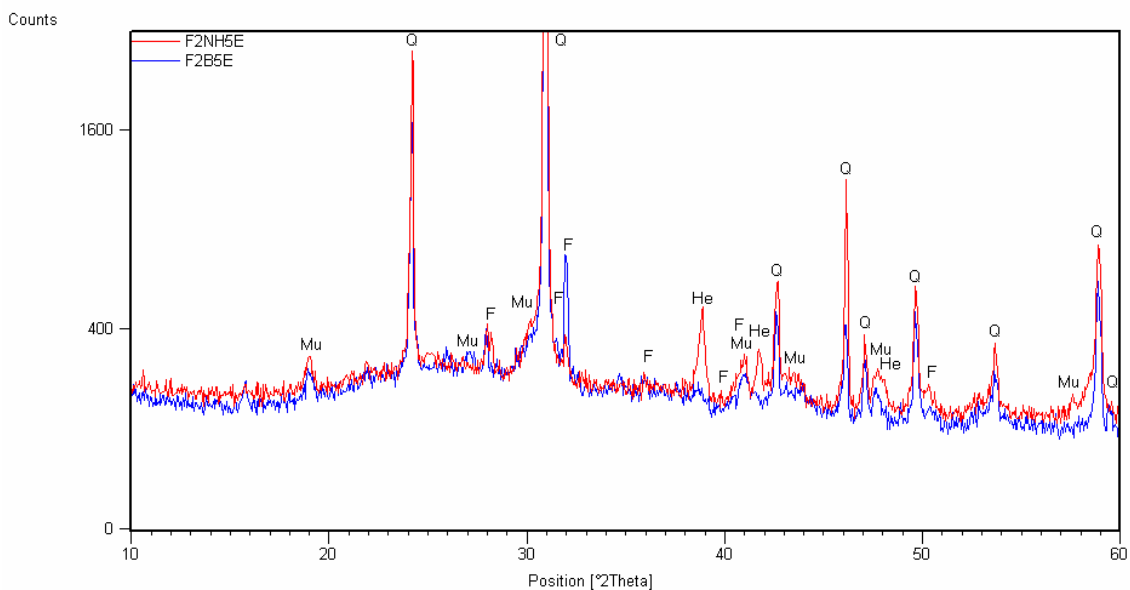


Figura 28 - Difractogramas de amostras das telhas do modelo 1 do fabricante 2

A Figura 28 apresenta os difractogramas das amostras das telhas do modelo 1 do fabricante 2. Observa-se que as telhas vermelhas (F2 NH) apresentam Hematite, o que lhes conferem a tonalidade, o que não acontece nas brancas (F2 B). As telhas brancas têm maior proporção de Mulite, o que confirma que durante a cozedura atingiram maior temperatura. As telhas brancas também têm maior proporção de Feldspatos do que as telhas vermelhas.

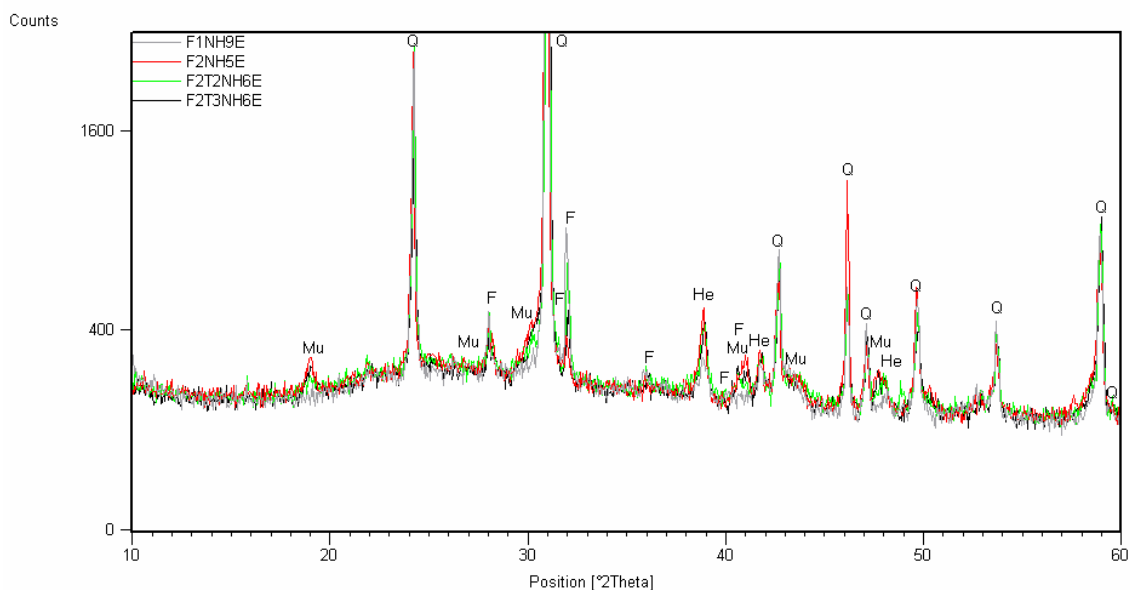


Figura 29 - Difractogramas de amostras das telhas vermelhas dos dois fabricantes

A Figura 29 permite comparar os difractogramas da amostra da telha vermelha do fabricante 1 e de amostras dos três modelos de telhas vermelhas do fabricante 2. As telhas vermelhas do fabricante 1 (F1 NH) têm maior proporção de Feldspatos e menor proporção de Hematite do que as telhas vermelhas do fabricante 2. Na amostra do fabricante 1 não foi detectada a presença de Mulite o que indica que durante a cozedura atingiu uma temperatura máxima inferior às das telhas vermelhas do fabricante 2.

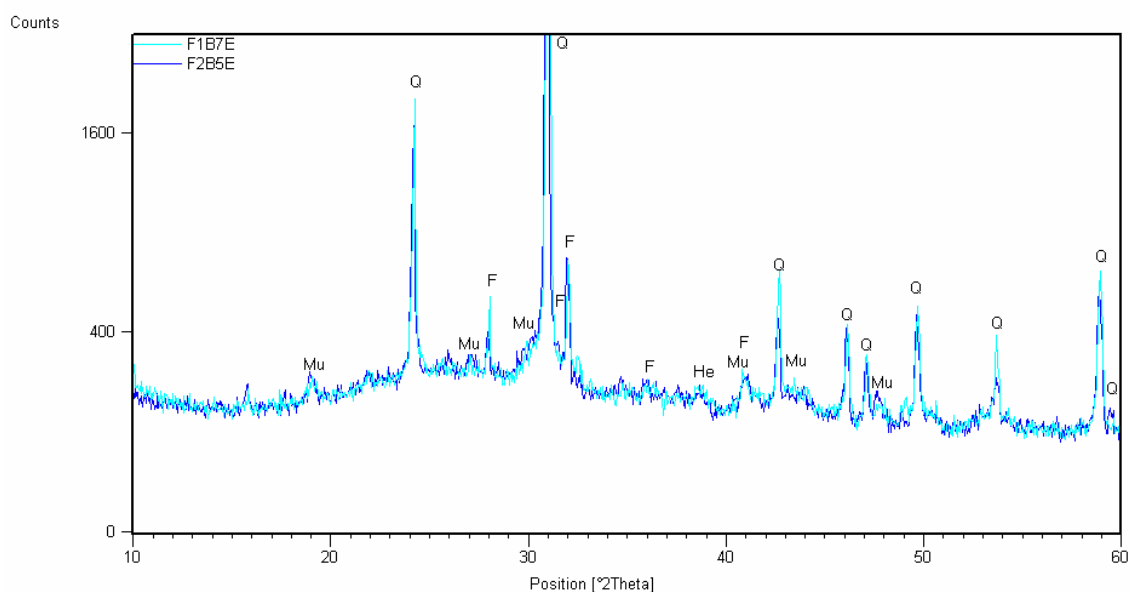


Figura 30 - Difractogramas de amostras das telhas brancas dos 2 fabricantes

A Figura 30 apresenta os difractogramas de amostras de telhas brancas dos dois fabricantes. As telhas brancas do fabricante 1 (F1 B) têm maior proporção de Feldspatos enquanto as telhas brancas do fabricante 2 (F2 B) têm uma proporção um pouco superior de Mulite, o que indica que terão atingido temperaturas superiores. Nas telhas brancas dos dois fabricantes há dúvidas quanto à presença de Hematite, como seria de esperar.

Tendo em conta as informações obtidas e os resultados da análise química e mineralógica, os tipos de telhas estudados podem ser ordenados em sequência crescente da temperatura de cozedura do seguinte modo:

Temperatura de cozedura	Sequência Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B
-------------------------	---------------------	---------------	------	----------	---------------	----------	------

5.3.2 Absorção de água fria por imersão

A absorção de água fria foi obtida de acordo com o especificado no Anexo A da NP EN 539-2 [14]. Após secagem a 60 °C até massa constante e arrefecimento, as telhas foram pesadas (massa seca, m_{tr}) e em seguida foram colocadas na posição vertical dentro de um recipiente. A imersão em água foi gradual, começando com $\frac{1}{4}$ da sua altura, passada uma hora o nível foi elevado para $\frac{1}{2}$ da altura, passada outra hora foi elevado para $\frac{3}{4}$ da altura e passada outra hora o nível foi elevado para (20 ± 5) mm acima dos provetes. As telhas foram mantidas submersas durante mais 48 horas, após o que foram retiradas da água, foi removida a água superficial e foram pesadas (massa húmida, $m_{n,u}$). A absorção de água (W_u) foi obtida a partir das massas seca e húmida usando a fórmula seguinte:

$$W_u = (m_{n,u} - m_{tr}) \times 100 / m_{tr} \quad [\%]$$

Na Figura 31 podem ver-se aspectos do ensaio de telhas em duas fases em que estão parcialmente submersas, com a água a dois níveis diferentes, e também durante as 48 horas de imersão total.

A determinação da absorção de água fria dos provetes retirados das telhas foi realizada de forma idêntica, com a diferença de que a imersão gradual começou a $\frac{1}{2}$ altura do provete e passada uma hora o nível foi elevado para (20 ± 5) mm acima dos provetes. Na Figura 32 podem ver-se aspectos do ensaio de provetes na fase em que estão parcialmente submersos e durante as 48 horas de imersão total.

No Quadro 19 são apresentadas as absorções de água de telhas inteiras do fabricante 1.

Quadro 19 - Absorção de água fria de telhas do fabricante 1

Telha	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
F1 NH 1	9,6
F1 B 1	9,4
F1 H 1	3,6



Figura 31 - Ensaio de absorção de água fria por imersão de telhas

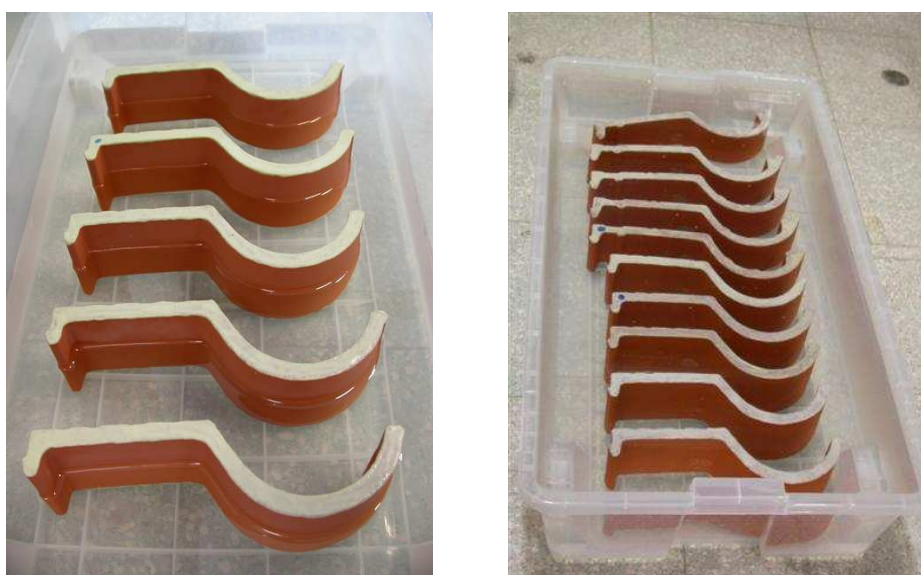


Figura 32 - Ensaio de absorção de água fria por imersão de provetes

No Quadro 20 e na Figura 33 são apresentadas as absorções de água de provetes dos três tipos de telhas do fabricante 1.

Quadro 20 - Absorção de água fria de provetes do fabricante 1

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
10	F1 NH 6 C	9,3
20	F1 NH 14 C	9,4
30	F1 NH 5 C	9,2
	F1 NH 9 C	9,2
	F1 NH 10 C	10,1
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 NH	9,5
Média de 5 provetes	F1 NH	9,4
10	F1 B 9 C	9,9
20	F1 B 13 C	9,0
30	F1 B 6 C	9,1
	F1 B 7 C	9,6
	F1 B 17 C	9,2
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 B	9,3
Média de 5 provetes	F1 B	9,4
10	F1 H 6 C	3,9
20	F1 H 3 C	8,7
30	F1 H 5 C	4,2
	F1 H 7 C	6,2
	F1 H 8 C	4,3
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 H	4,9
Média de 5 provetes	F1 H	5,5

A média da absorção de água dos provetes não hidrofugados do fabricante 1 (vermelhos e brancos) é idêntica à absorção de água das telhas dos mesmos tipos.

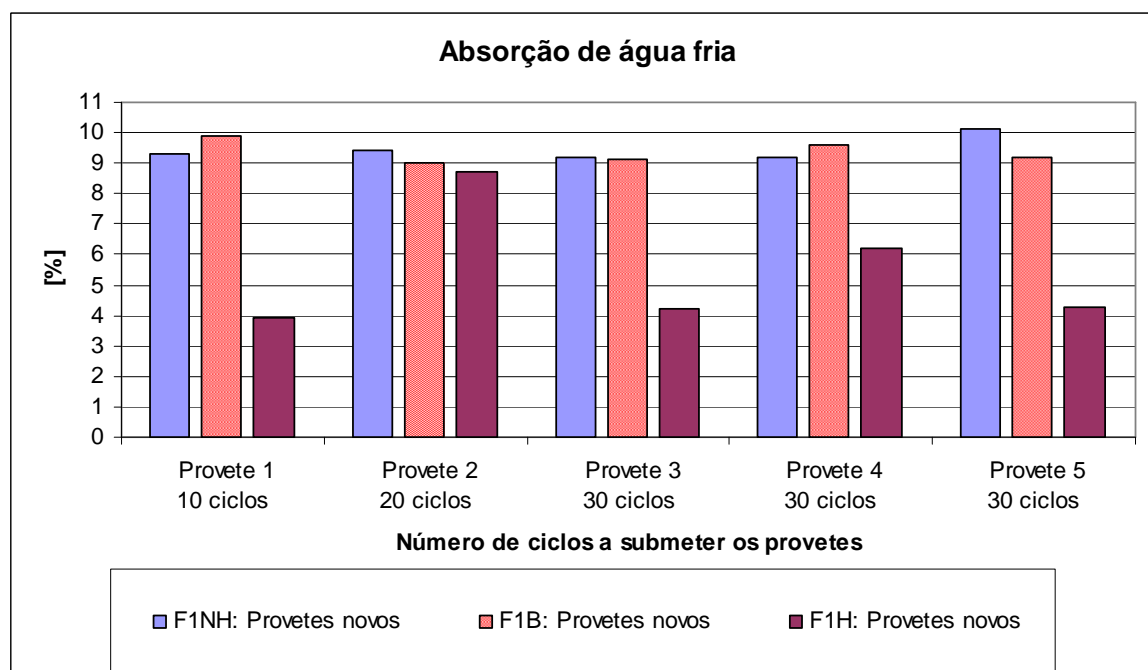


Figura 33 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1

No Quadro 21 são apresentadas as absorções de água de telhas inteiras dos cinco tipos do fabricante 2. No Quadro 22 e no Quadro 23 são apresentadas as absorções de água de provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2.

Quadro 21 - Absorção de água fria de telhas inteiras do fabricante 2

Telha	Absorção de água fria por imersão
	W_u [%]
F2 NH 2	6,1
F2 B 1	6,8
F2 B 2	6,8
F2 H 2	0,6
F2 T2 NH 2	8,2
F2 T3 NH 1	6,0
F2 T3 NH 2	5,9

Quadro 22 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
10	F2 NH 8 C	5,8
20	F2 NH 9 C	5,8
30	F2 NH 4 C F2 NH 5 C F2 NH 11 C	5,9 5,9 6,5
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 NH	6,1
Média de 5 provetes	F2 NH	6,0
10	F2 B 7 C F2 B 8 C	7,3 7,3
20	F2 B 6 C F2 B 9 C	7,3 6,8
30	F2 B 5 C F2 B 10 C F2 B 11 C	7,2 6,8 6,8
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 B	6,9
Média de 7 provetes	F2 B	7,1
10	F2 H 7 C	0,6
20	F2 H 5 C	0,6
30	F2 H 3 C F2 H 6 C F2 H 8 C	0,6 1,2 0,4
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 H	0,7
Média de 5 provetes	F2 H	0,7

Quadro 23 - Absorção de água fria dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
10	F2 T2 NH 5 C	8,2
20	F2 T2 NH 3 C	8,3
30	F2 T2 NH 6 C	8,3
	F2 T2 NH 10 C	8,2
	F2 T2 NH 11 C	8,2
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 T2 NH	8,2
Média de 5 provetes	F2 T2 NH	8,2
10	F2 T3 NH 8 C	6,0
	F2 T3 NH 10 C	5,9
20	F2 T3 NH 11 C	6,1
	F2 T3 NH 12 C	5,8
30	F2 T3 NH 3 C	5,7
	F2 T3 NH 4 C	5,7
	F2 T3 NH 6 C	6,1
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 T3 NH	5,8
Média de 7 provetes	F2 T3 NH	5,9

Na Figura 34 são apresentados graficamente os valores da absorção de água dos três tipos de provetes do fabricante 2 de que foram ensaiados cinco provetes e na Figura 35 os valores da absorção de água dos dois tipos de provetes de que foram ensaiados sete provetes. A Figura 36 apresenta o gráfico global da absorção de água de todos os provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2.

A média das absorções de água dos provetes do fabricante 2 é idêntica à absorção de água das telhas dos mesmos tipos. Como é expectável verifica-se portanto que a absorção de água dos provetes não hidrofugados do fabricante 1 e de todos os tipos de provetes do fabricante 2 é representativa da absorção de água das telhas de onde são retirados.

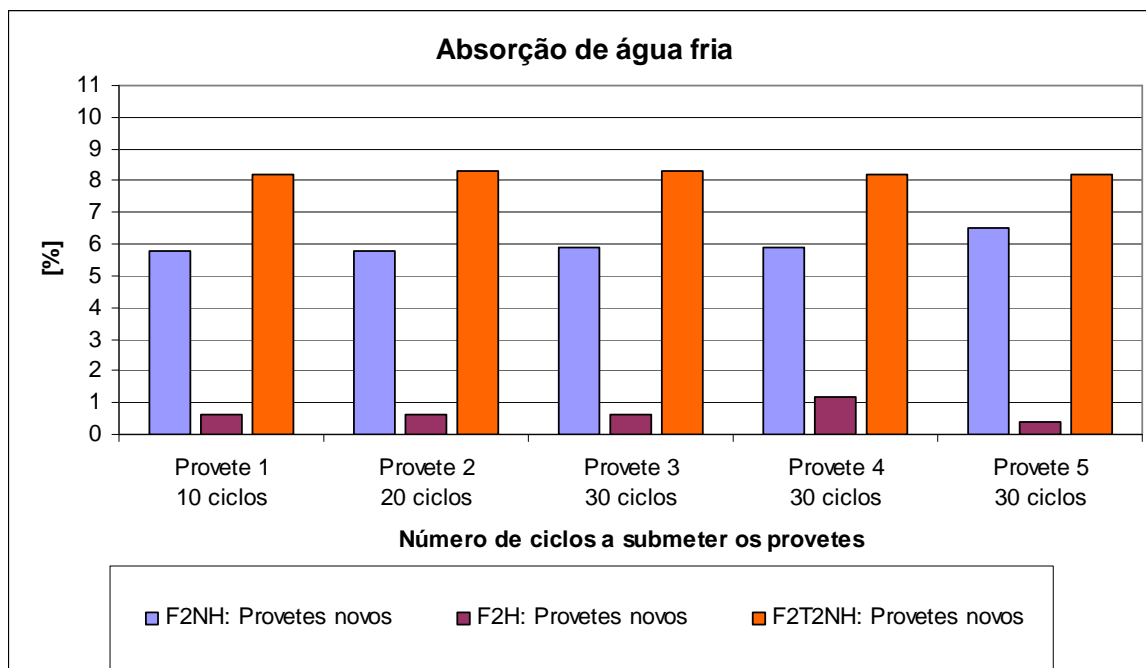


Figura 34 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2

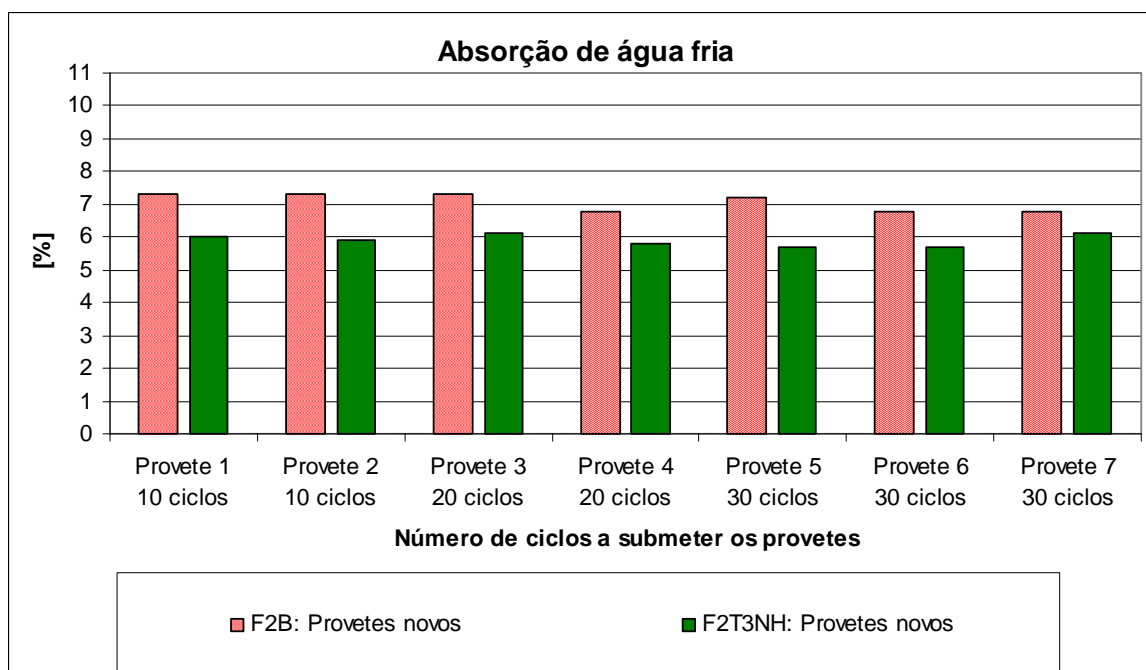


Figura 35 - Absorção de água fria dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

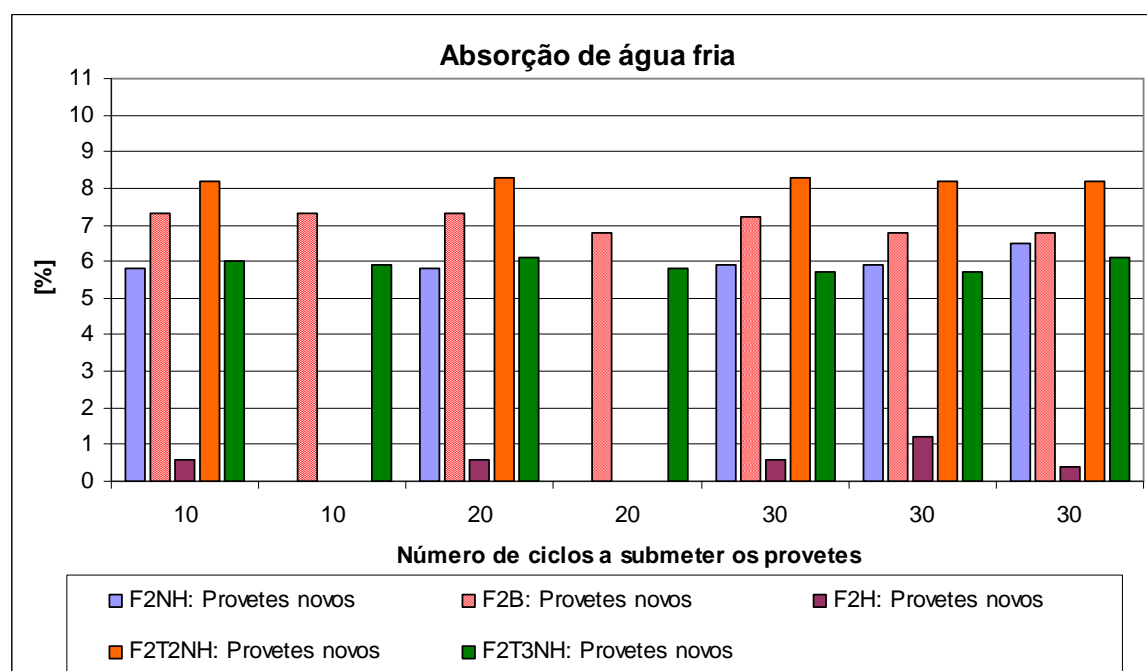


Figura 36 - Absorção de água fria de todos os tipos de provetes do fabricante 2 (gráfico global)

Em cada um dos fabricantes as telhas e os provetes hidrofugados apresentam uma maior gama de valores da absorção de água. Estes valores da absorção de água não caracterizam o material cerâmico cozido mas permitem comparar a eficácia da hidrofugação de telhas e de provetes do mesmo tipo ou de tipos diferentes.

Quando em provetes hidrofugados do mesmo tipo existem alguns com maior absorção de água tal também pode ser devido a deficiências na camada de selante colocada nas faces cortadas dos provetes.

Como as telhas e os provetes hidrofugados apresentam valores baixos da absorção de água, os resultados são mais susceptíveis à variabilidade do procedimento de ensaio, designadamente durante a operação de remoção da água superficial, depois de retirados da água em que estiveram submersos.

Na Figura 37 é apresentado o gráfico com os valores médios da absorção de água fria e no Quadro 24 os tipos de provetes ordenados por sequência decrescente da sua absorção de água e por sequência crescente da temperatura de cozedura.

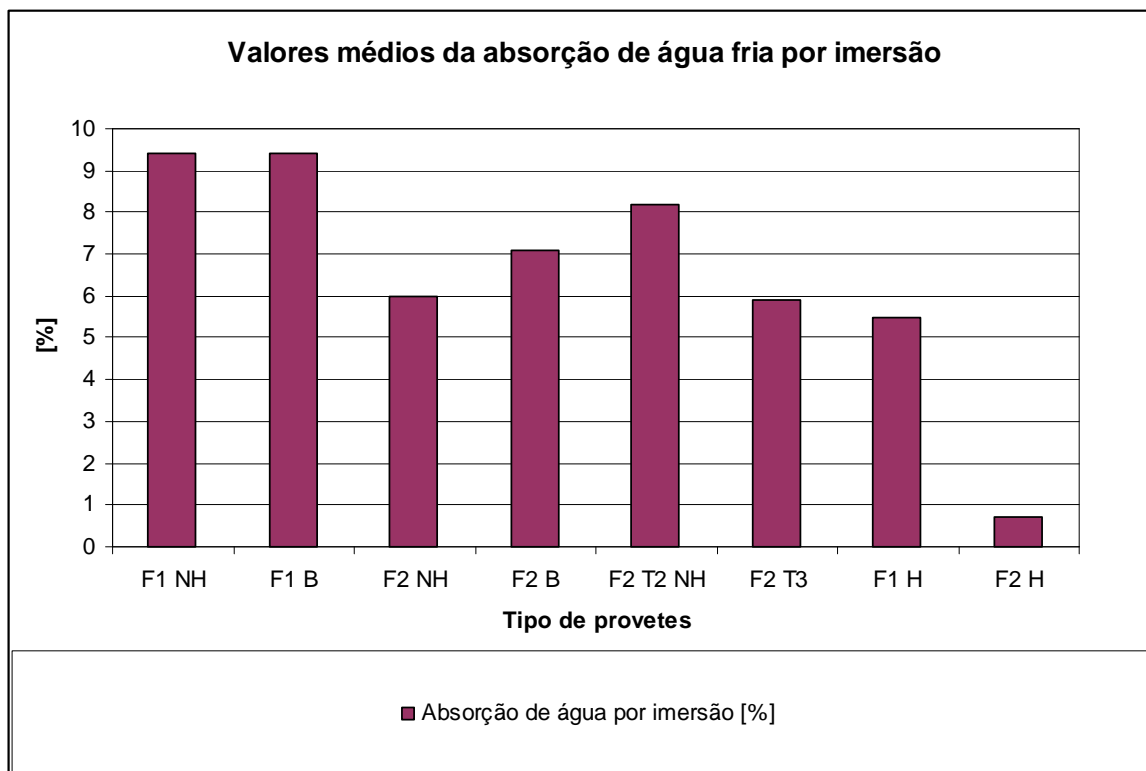


Figura 37 - Valores médios da absorção de água fria

Quadro 24 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura e da absorção de água

Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–
Absorção de água por imersão	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1 H	F2 H

Os diversos tipos de telhas ensaiados apresentaram diferentes absorções de água. Naturalmente as telhas e provetes hidrofugados de cada fabricante apresentam valores muito inferiores aos dos produtos não hidrofugados do mesmo fabricante.

A absorção de água dos provetes e telhas hidrofugadas do fabricante 1 é superior à das telhas e provetes hidrofugados do fabricante 2. A maior eficácia da hidrofugação realizada por este fabricante poderá ser explicada por diferenças quer do produto hidrofugante quer do tempo de impregnação.

Os produtos não hidrofugados do fabricante 1 apresentam maior absorção de água do que os do fabricante 2. Nos provetes vermelhos não hidrofugados dos dois fabricantes observa-se que a sequência decrescente da absorção de água pode ser explicada pela sequência crescente da temperatura de cozedura. Tal não acontece nos provetes brancos relativamente aos provetes vermelhos do mesmo fabricante.

A média da absorção de água dos provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) é igual à dos provetes vermelhos (F1 NH), apesar destes atingirem uma temperatura máxima de cozedura inferior. A média da absorção de água dos provetes brancos do fabricante 2 (F2 B) é superior às dos provetes F2 NH e F2 T3 NH, apesar da temperatura de cozedura das telhas F2 B ser a maior de todos os tipos de telhas estudados. Isto poderá ser explicado pela diferença de outros parâmetros de fabrico, como o tipo de matérias-primas.

Entre os produtos do fabricante 2, os do modelo 2 (F2 T2 NH) são os que têm maior absorção de água. Os produtos do modelo 3 (F2 T3 NH) têm menor absorção do que todos os restantes produtos não hidrofugados dos dois fabricantes.

5.3.3 Absorção de água sob vácuo, massas volúmicas e porosidade aberta

O ensaio de absorção de água sob vácuo foi realizado com base na NP EN 1936:2001 [62].

Este ensaio permitiu obter as seguintes características dos provetes:

- Massa volúmica real da matéria impermeável;
- Massa volúmica aparente;
- Porosidade aberta;
- Absorção de água sob vácuo.

Para este ensaio foram utilizados provetes novos do tipo B e D (vd. Figura 24) retirados das mesmas telhas de onde foram retirados os provetes C sujeitos aos ensaios cíclicos de nevoeiro/secagem. Alguns dos provetes B e D utilizados neste ensaio de absorção de água sob vácuo foram posteriormente sujeitos ao ensaio composto de envelhecimento acelerado.

Foram ensaiados todos os tipos de provetes não hidrofugados, já que com este ensaio se pretende principalmente obter características hídricas do material cozido constituinte das telhas e avaliar depois se essas características sofrem alguma alteração por acção do ensaio de envelhecimento acelerado.

Como já foi referido, as telhas hidrofugadas são obtidas a partir de telhas não hidrofugadas que no fim do processo de fabrico são imersas no produto hidrofugante. Portanto são constituídas por uma camada interior não hidrofugada e por uma camada superficial hidrofugada. A camada interior tem as mesmas características hídricas do material cerâmico cozido das telhas não hidrofugadas do mesmo modelo e fabricante. A avaliação da eficácia inicial da camada hidrofugada e a resistência dessa hidrofugação à acção do envelhecimento acelerado será avaliada por comparação de outras características, como a absorção de água fria à pressão atmosférica.

Os provetes foram ensaiados sem resina epoxi a selar as faces cortadas, o que não terá uma influência significativa nos resultados do ensaio face a provetes com selante nas faces cortadas. A imersão em água sob vácuo permite impregnar a quase totalidade dos poros abertos. A camada de resina epoxi não iria impedir que tal também acontecesse caso as faces de corte dos provetes estivessem seladas.

Após secagem a 60 °C até massa constante e arrefecimento, os provetes foram pesados (massa seca, m_d).

Os provetes foram colocados num recipiente e mantidos durante 24 horas numa depressão de $(2,0 \pm 0,7)$ kPa, para eliminar o ar contido nos poros abertos. Foi introduzida água no recipiente, até que os provetes ficaram completamente submersos, e mantida a depressão durante o enchimento e nas 24 horas subsequentes (Figura 38). De seguida a pressão no recipiente foi aumentada até à pressão atmosférica normal e os provetes permaneceram imersos a esta pressão durante mais 24 horas.

As massas dos provetes saturados foram determinadas na balança hidrostática apresentada na Figura 38. A massa aparente dos provetes saturados foi obtida por pesagem hidrostática

(Figura 39) dos provetes imersos em água (m_h). De seguida os provetes foram tirados da água, limpos com um pano húmido para retirar o excesso de água superficial e novamente pesados, agora ao ar (Figura 39), obtendo-se a massa dos provetes saturados (m_s).



Figura 38 - Imersão em água sob vácuo e balança hidrostática



Figura 39 - Pesagem hidrostática e pesagem ao ar

A absorção de água por imersão em água sob vácuo (W_s) foi obtida a partir da massa dos provetes secos (m_d) e da massa dos provetes saturados pelo método de imersão sob vácuo (m_s), usando a fórmula seguinte:

$$W_s = (m_s - m_d) \times 100 / m_d \quad [\%]$$

A massa volúmica aparente (ρ_b , kg/m³) dos provetes é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume aparente. A massa volúmica aparente foi então obtida a partir dessa massa do provete seco (m_d , g), da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s , g), da massa aparente do provete saturado imerso em água (m_h , g), e da massa volúmica da água (ρ_{rh} , kg/m³), usando a fórmula seguinte:

$$\rho_b = m_d \times \rho_{rh} / (m_s - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

A porosidade aberta (p_o , %) dos provetes é a razão entre o volume dos poros abertos (V_o , ml) e o volume aparente (V_b , ml) dos provetes e foi calculada a partir da massa do provete saturado pelo método de imersão sob vácuo (m_s , g), da massa do provete seco (m_d , g) e da massa aparente do provete imerso em água (m_h , g), após saturação sob vácuo, através da equação:

$$p_o = 100 \times (m_s - m_d) / (m_s - m_h) \quad [\%]$$

A massa volúmica real da matéria impermeável (ρ_{imp} , kg/m³) é a razão entre a massa do provete seco e o seu volume impermeável, sendo este a diferença entre o volume aparente e o volume de poros abertos. A massa volúmica real da matéria impermeável foi obtida a partir da massa do provete seco (m_d , g), da massa volúmica da água (ρ_{rh} , kg/m³) e da massa aparente do provete saturado imerso em água (m_h , g) e calculada usando a fórmula:

$$\rho_{imp} = m_d \times \rho_{rh} / (m_d - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

No Quadro 25 e no Quadro 26 são apresentadas a massa volúmica real da matéria impermeável, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em água sob vácuo dos provetes não hidrofugados do fabricante 1.

Quadro 25 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes F1 NH

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta P_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
10	F1 NH 6 D	2690	2070	23,2	11,2
20	F1NH14 D		2060	23,3	11,3
30	F1 NH 5 D		2070	23,1	11,1
	F1 NH 9 D		2080	22,9	11,0
	F1 NH10 D		2050	23,9	11,6
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 NH D	2690	2070	23,3	11,2
Média de 5 provetes	F1 NH D	2690	2070	23,3	11,2

Quadro 26 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes F1 B

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta P_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
10	F1 B 9 D	2680	2010	24,8	12,3
20	F1 B 13 D		2030	24,1	11,8
30	F1 B 6 D		2050	23,6	11,5
	F1 B 7 D		2030	24,5	12,1
	F1 B 17 D		2040	23,8	11,7
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 B D	2680	2040	24,0	11,8
Média de 5 provetes	F1 B D	2680	2030	24,2	11,9

Na Figura 40 são apresentados graficamente os mesmos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente dos provetes não hidrofugados do fabricante 1.

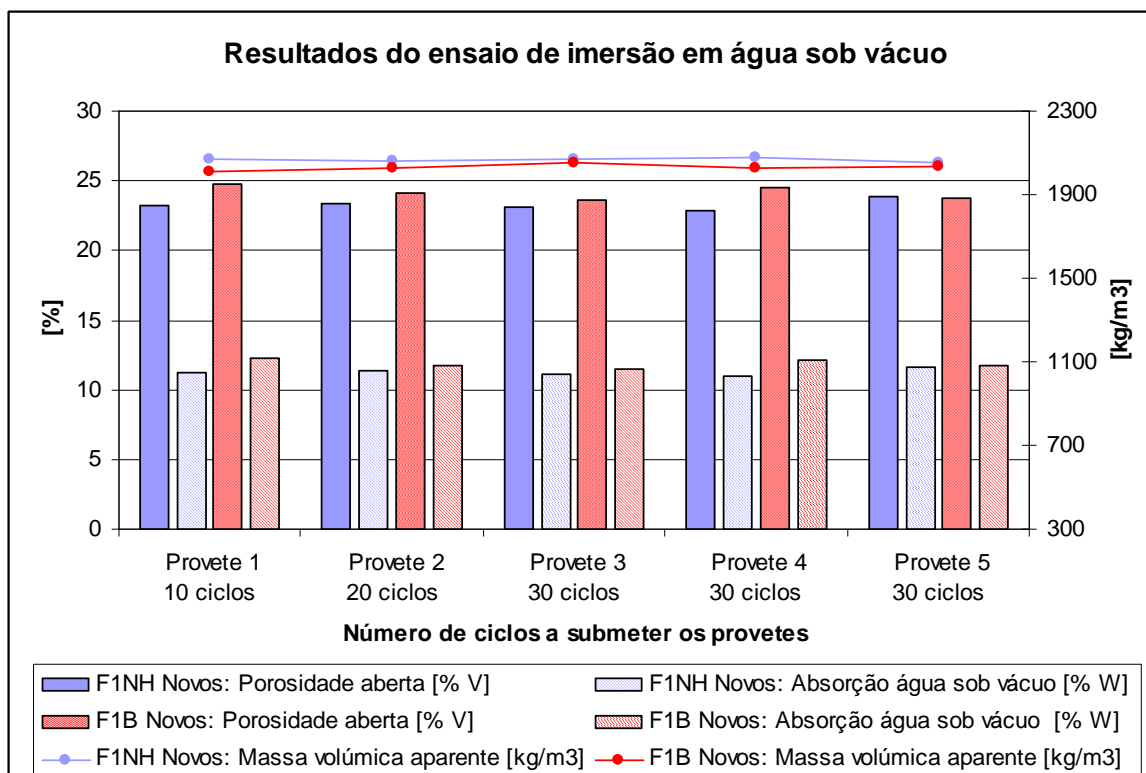


Figura 40 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo de provetes do fabricante 1

No Quadro 27 e no Quadro 28 são apresentadas a massa volúmica real da matéria impermeável, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em água sob vácuo dos provetes não hidrofugados do fabricante 2.

Quadro 27 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
10	F2 NH 8 B	2700	2210	18,2	8,2
20	F2 NH 9 B	2700	2210	18,2	8,2
30	F2 NH 4 B	2700	2210	18,1	8,2
	F2 NH 5 B	2700	2210	18,3	8,3
	F2 NH 11 B	2710	2190	19,2	8,8
Média de 3 provetes	F2 NH B	2700	2200	18,5	8,4
Média de 5 provetes	F2 NH B	2700	2210	18,4	8,3

Quadro 28 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B, F2 T2 NH e F2 T3 NH

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
10	F2 B 7 B F2 B 8 B	2650	2070 2070	22,1 22,1	10,7 10,7
20	F2 B 6 B F2 B 9 B		2070 2080	22,1 21,4	10,7 10,3
30	F2 B 5 B F2 B 10 B F2 B 11 B		2060 2080 2080	22,2 21,5 21,4	10,7 10,3 10,3
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 B B	2650	2070	21,7	10,4
Média de 7 provetes	F2 B B	2650	2070	21,8	10,5
10	F2 T2 NH 5 B	2720	2140	21,4	10,0
20	F2 T2 NH 3 B		2140	21,5	10,1
30	F2 T2 NH 6 B		2140	21,5	10,0
	F2 T2 NH 10 B		2140	21,4	10,0
	F2 T2 NH 11 B		2140	21,4	10,0
Média de 3 provetes	F2 T2 NH B	2720	2140	21,4	10,0
Média de 5 provetes	F2 T2 NH B	2720	2140	21,4	10,0
10	F2 T3 NH 8 B F2 T3 NH 10 B	2700 ---	2210 ---	18,1 ---	8,2 ---
20	F2 T3NH 11 B F2 T3 NH 12 B	--- 2700	--- 2220	--- 17,9	--- 8,1
30	F2 T3 NH 3 B	2700	2220	17,7	8,0
	F2 T3 NH 4 B	2700	2220	17,6	7,9
	F2 T3 NH 6 B	2700	2210	18,3	8,3
Média de 3 provetes	F2 T3 NH B	2700	2220	17,9	8,1
Média de 5 provetes	F2 T3 NH B	2700	2220	17,9	8,1

Na Figura 41 e na Figura 42 são apresentados graficamente os mesmos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente dos provetes não hidrofundados do fabricante 2.

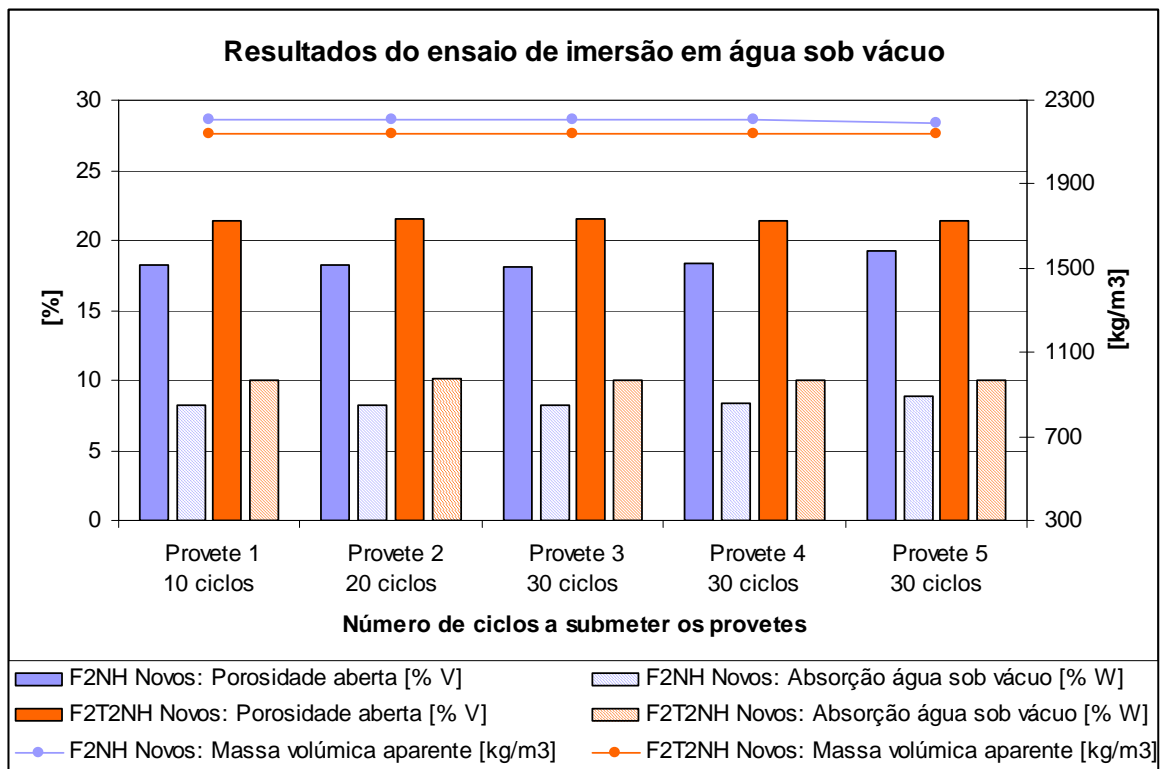


Figura 41 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2

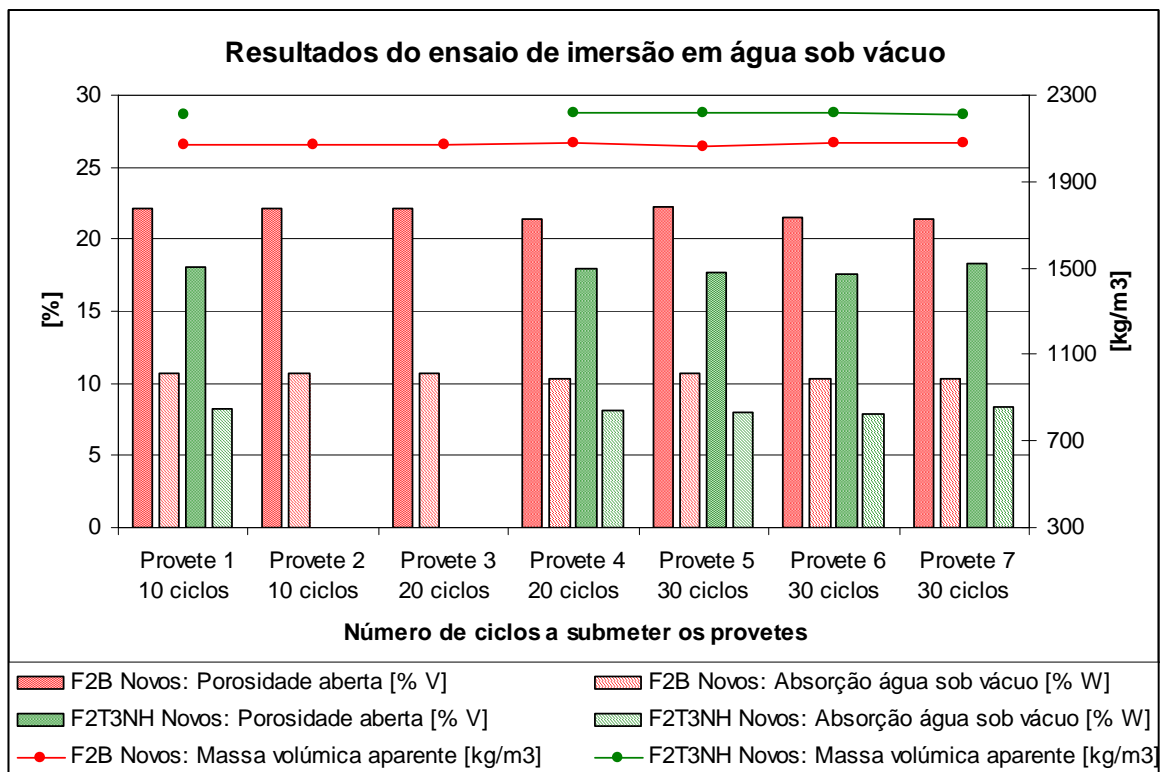


Figura 42 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

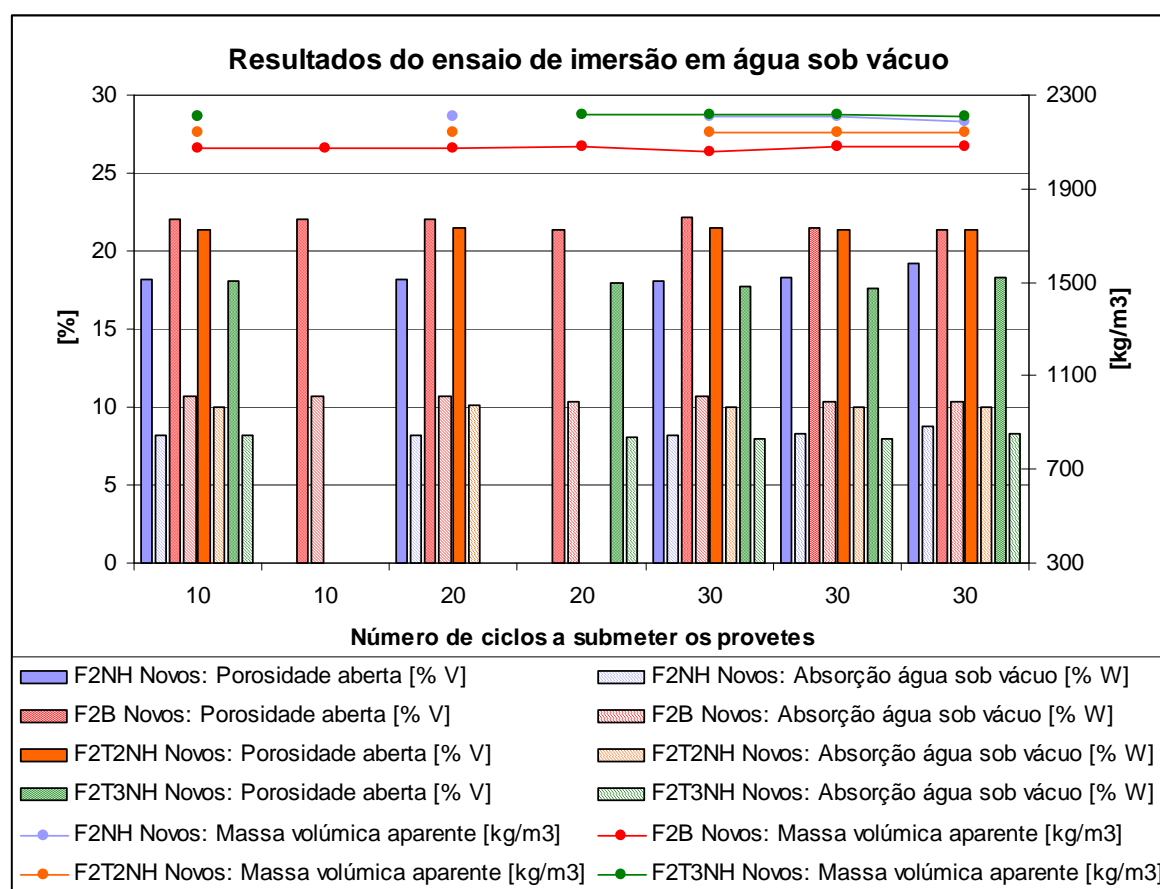


Figura 43 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes do fabricante 2 (gráfico global)

A Figura 43 apresenta o gráfico global dos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente de todos os provetes dos quatro tipos de telhas não hidrofugadas do fabricante 2.

A massa volúmica real da matéria impermeável varia pouco nos tipos de provetes estudados, entre 2650 kg/m^3 dos provetes brancos do fabricante 2 (F2 B) e 2720 kg/m^3 dos provetes vermelhos do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH). Esta característica é a razão entre a massa dos provetes secos e o seu volume impermeável, que é o volume da matéria sólida mais o volume dos poros fechados, não acessíveis à água.

Os seis tipos de provetes ensaiados apresentam diferentes valores de massa volúmica aparente, porosidade aberta e absorção de água por imersão em água sob vácuo.

Na Figura 44 é apresentado o gráfico com os valores médios da absorção de água fria por imersão, da absorção de água por imersão em água sob vácuo, da porosidade aberta e da massa volúmica aparente de todos os tipos de provetes não hidrofugados. O Quadro 29 apresenta os tipos de provetes ordenados por sequência crescente da temperatura de cozedura, por sequência decrescente das absorções de água e da porosidade aberta e por sequência crescente da massa volúmica aparente.

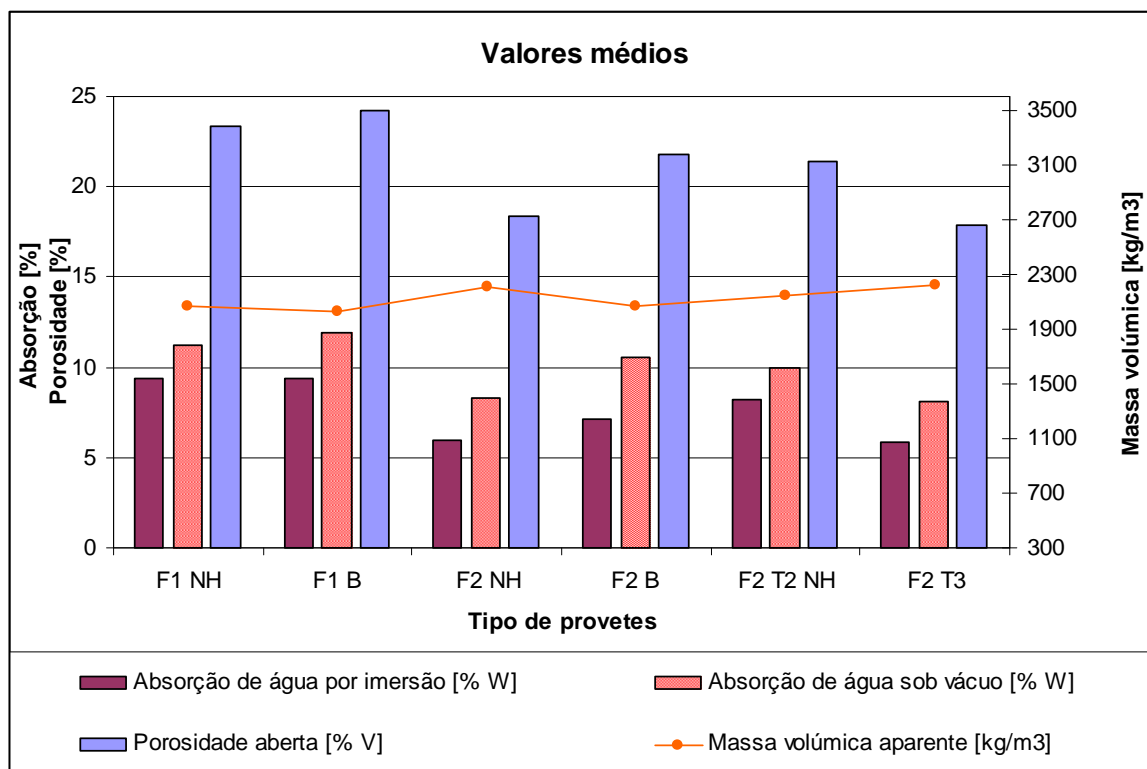


Figura 44 - Valores médios da absorção de água por imersão e dos resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo

Quadro 29 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, da absorção de água e dos resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo

Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B
Absorção de água por imersão	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH
Absorção de água sob vácuo	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH
Porosidade aberta	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH
Massa volúmica aparente	Crescente	F1 B	F1 NH F2 B	–	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH

A sequência dos tipos de provetes ordenados pelo valor decrescente da absorção de água sob vácuo é igual à sequência ordenada pelo valor decrescente da porosidade aberta e pelo valor crescente da massa volúmica aparente. Portanto a maiores absorções de água sob vácuo correspondem maiores porosidades abertas e menores massas volúmicas aparentes.

Comparando estas propriedades com a absorção por imersão em água fria à pressão atmosférica verifica-se que a sequência decrescente da absorção de água sob vácuo e da porosidade não é igual à sequência decrescente da absorção de água por imersão. Existe uma inversão entre os provetes brancos (F1 B) e vermelhos (F1 NH) do fabricante 1 e entre os provetes brancos (F2 B) e vermelhos do modelo 2 (F2 T2 NH) do fabricante 2.

Os provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) têm a mesma absorção de água por imersão do que os vermelhos desse fabricante (F1 NH), mas têm maior absorção de água sob vácuo, maior porosidade aberta e menor massa volúmica aparente.

No caso do fabricante 2 os provetes brancos (F2 B) atingem temperaturas superiores durante a cozedura e a sua absorção de água por imersão é inferior à dos provetes F2 T2 NH e superior à dos provetes F2 NH e F2 T3 NH. No entanto são os provetes F2 B que têm maior absorção de água sob vácuo, maior porosidade aberta e menor massa volúmica aparente.

Entre todos os tipos de telhas não hidrofugados dos dois fabricantes, os provetes vermelhos do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH) apresentam a menor absorção de água por imersão, a menor absorção de água sob vácuo e a menor porosidade aberta, sendo seguidos pelos provetes vermelhos do modelo 1 (F2 NH). Os provetes F2 T3 NH têm a maior massa volúmica aparente, sendo também seguidos nesta característica pelos provetes F2 NH.

Os provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) são os que têm maior absorção de água sob vácuo, maior porosidade aberta e menor massa volúmica aparente. A sua absorção de água por imersão é igual à dos provetes com maior absorção (F1 NH).

Considerando apenas as telhas vermelhas, as do fabricante 1 (F1 NH) têm maior absorção de água por imersão, maior absorção de água sob vácuo, maior porosidade aberta e menor massa volúmica aparente.

5.3.4 Coeficiente de saturação

A partir da absorção de água fria por imersão dos provetes novos do tipo C e da absorção por imersão em água sob vácuo dos provetes novos do tipo D, provenientes da mesma telha de que foi retirado o correspondente provete C, é possível calcular o coeficiente de saturação dos diversos tipos de telhas estudados.

O coeficiente de saturação é obtido pela relação, em forma percentual, entre a absorção de água por imersão em água fria e a absorção de água sob vácuo e foi calculado pela fórmula:

$$S = 100 \times W_u / W_s \quad [\%]$$

No Quadro 30, no Quadro 31 e na Figura 45 são apresentados os valores das absorções de água e do coeficiente de saturação dos provetes não hidrofugados do fabricante 1.

Quadro 30 - Coeficiente de saturação dos provetes F1 NH do fabricante 1

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água por imersão W_u [%]	Provetes novos	Absorção de água sob vácuo W_s [%]	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
10	F1 NH 6 C	9,3	F1 NH 6 D	11,2	83
20	F1NH14 C	9,4	F1NH 14 D	11,3	83
30	F1 NH 5 C	9,2	F1 NH 5 D	11,1	83
	F1 NH 9 C	9,2	F1 NH 9 D	11,0	84
	F1 NH 10 C	10,1	F1 NH 10 D	11,6	87
Média de 3 provetes	F1 NH C	9,5	F1 NH D	11,2	85
Média de 5 provetes	F1 NH C	9,4	F1 NH D	11,2	84

Quadro 31 - Coeficiente de saturação dos provetes F1 B do fabricante 1

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água por imersão W_u [%]	Provetes novos	Absorção de água sob vácuo W_s [%]	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
10	F1 B 9 C	9,9	F1 B 9 D	12,3	80
20	F1 B 13 C	9,0	F1 B 13 D	11,8	76
30	F1 B 6 C	9,1	F1 B 6 D	11,5	79
	F1 B 7 C	9,6	F1 B 7 D	12,1	79
	F1 B 17 C	9,2	F1 B 17 D	11,7	79
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 B C	9,3	F1 B D	11,8	79
Média de 5 provetes	F1 B C	9,4	F1 B D	11,9	79

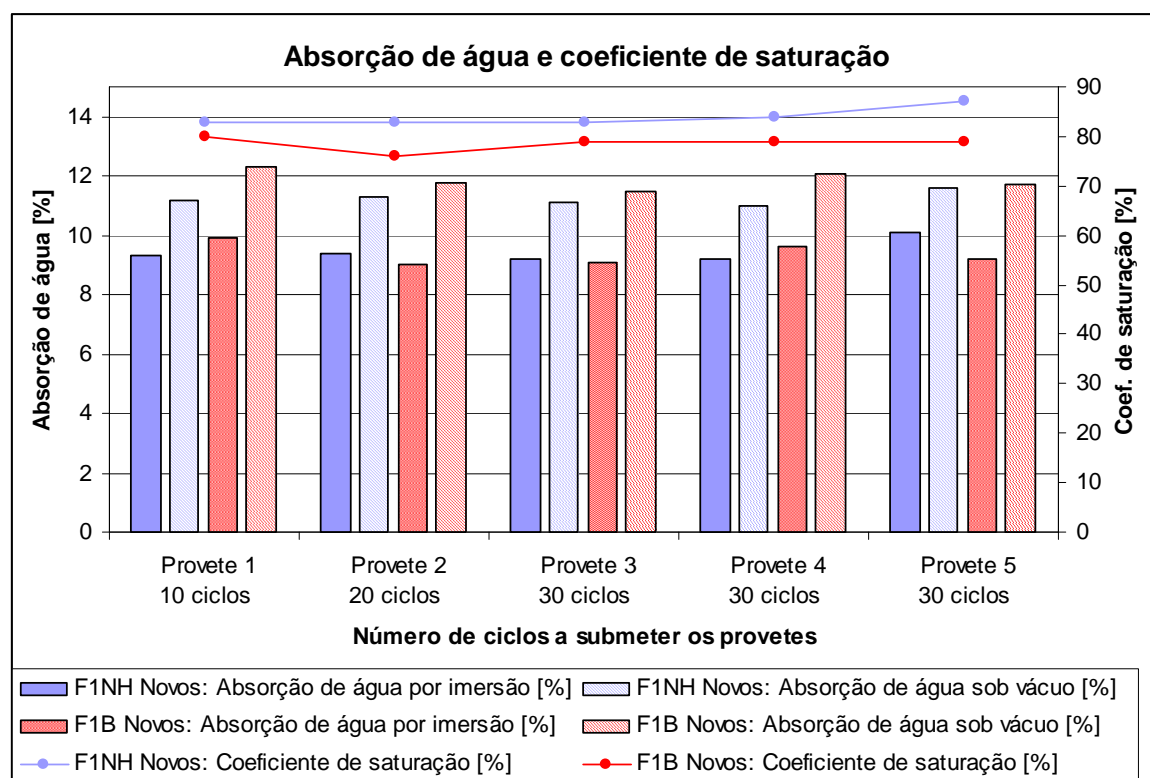


Figura 45 - Coeficiente de saturação dos provetes do fabricante 1

No Quadro 32 e no Quadro 33 são apresentados os valores das absorções de água e do coeficiente de saturação dos provetes não hidrofugados do fabricante 2.

Quadro 32 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 NH e F2 B do fabricante 2

Nº de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Absorção de água por imersão W_u [%]	Provetes novos	Absorção de água sob vácuo W_s [%]	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
10	F2 NH 8 C	5,8	F2 NH 8 B	8,2	71
20	F2 NH 9 C	5,8	F2 NH 9 B	8,2	71
30	F2 NH 4 C	5,9	F2 NH 4 B	8,2	72
	F2 NH 5 C	5,9	F2 NH 5 B	8,3	71
	F2 NH 11 C	6,5	F2 NH 11 B	8,8	74
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 NH C	6,1	F2 NH B	8,4	72
Média de 5 provetes	F2 NH C	6,0	F2 NH B	8,3	72
10	F2 B 7 C	7,3	F2 B 7 B	10,7	68
	F2 B 8 C	7,3	F2 B 8 B	10,7	68
20	F2 B 6 C	7,3	F2 B 6 B	10,7	68
	F2 B 9 C	6,8	F2 B 9 B	10,3	66
30	F2 B 5 C	7,2	F2 B 5 B	10,7	67
	F2 B 10 C	6,8	F2 B 10 B	10,3	66
	F2 B 11 C	6,8	F2 B 11 B	10,3	66
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 B C	6,9	F2 B B	10,4	66
Média de 7 provetes	F2 B C	7,1	F2 B B	10,5	67

Quadro 33 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2

Nº de ciclos a submeter os prov.	Provetes novos	Absorção de água por imersão W_u [%]	Provetes novos	Absorção de água sob vácuo W_s [%]	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
10	F2 T2 NH 5 C	8,2	F2 T2 NH 5 B	10,0	82
20	F2 T2 NH 3 C	8,3	F2 T2 NH 3 B	10,1	82
30	F2 T2 NH 6 C	8,3	F2 T2 NH 6 B	10,0	83
	F2 T2 NH 10C	8,2	F2 T2 NH 10B	10,0	82
	F2 T2 NH 11C	8,2	F2 T2 NH 11B	10,0	82
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 T2 NH C	8,2	F2 T2 NH B	10,0	82
Média de 5 prov.	F2 T2 NH C	8,2	F2 T2 NH B	10,0	82
10	F2 T3 NH 8 C	6,0	F2 T3 NH 8 B	8,2	73
	F2 T3 NH 10C	5,9	F2 T3 NH 10B	---	---
20	F2 T3 NH 11C	6,1	F2 T3 NH 11B	---	---
	F2 T3 NH 12C	5,8	F2 T3 NH 12B	8,1	72
30	F2 T3 NH 3 C	5,7	F2 T3 NH 3 B	8,0	71
	F2 T3 NH 4 C	5,7	F2 T3 NH 4 B	7,9	72
	F2 T3 NH 6 C	6,1	F2 T3 NH 6 B	8,3	73
Média de 3 prov.	F2 T3 NH C	5,8	F2 T3 NH B	8,1	72
Média de 7 e de 5 prov.	F2 T3 NH C	5,9	F2 T3 NH B	8,1	72

Na Figura 46 é apresentado o gráfico com os valores das absorções de água e do coeficiente de saturação dos dois tipos de provetes não hidrofugados do fabricante 2 de que foram ensaiados 5 provetes e na Figura 47 os valores dos dois tipos de provetes de que foram ensaiados 7 provetes.

A Figura 48 apresenta o gráfico global com os valores dos provetes dos quatro tipos de telhas não hidrofugadas do fabricante 2.

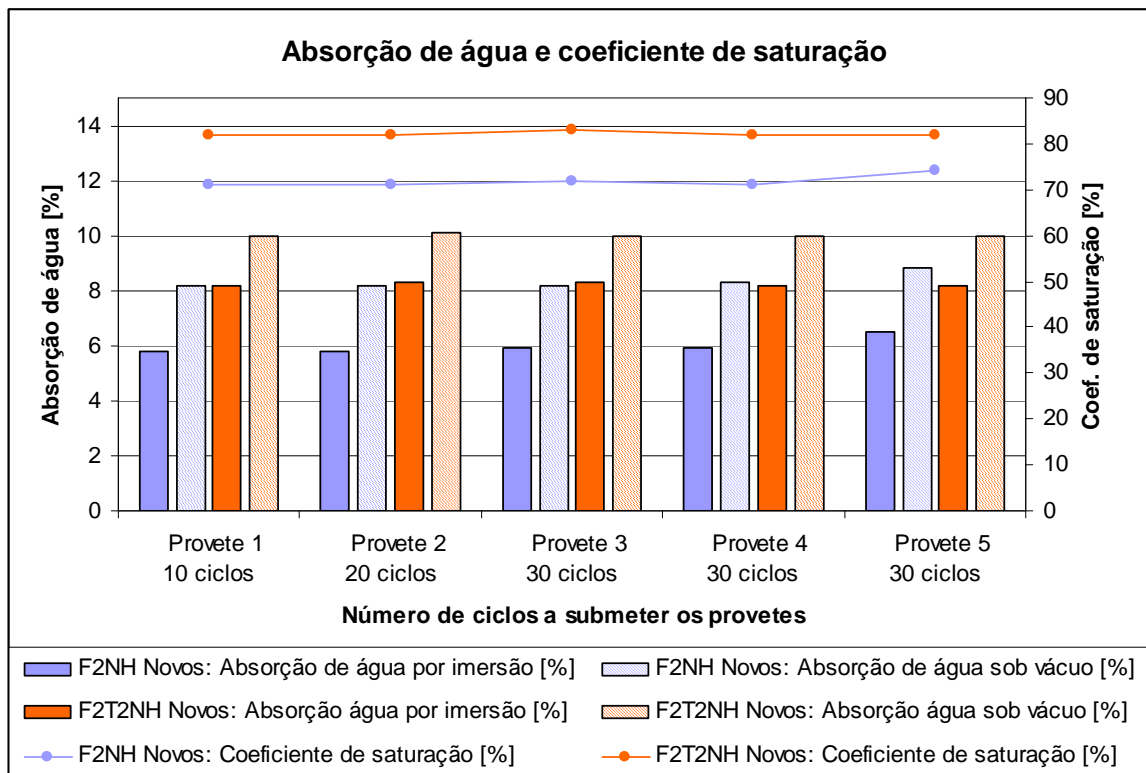


Figura 46 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2

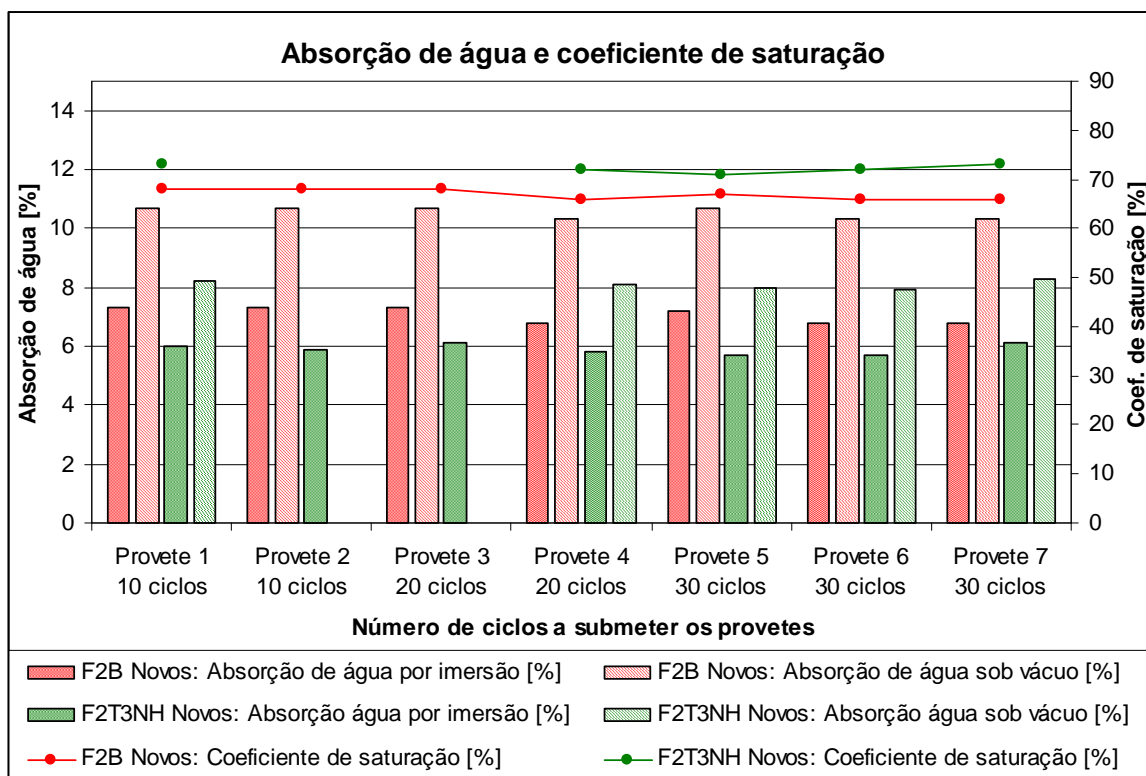


Figura 47 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

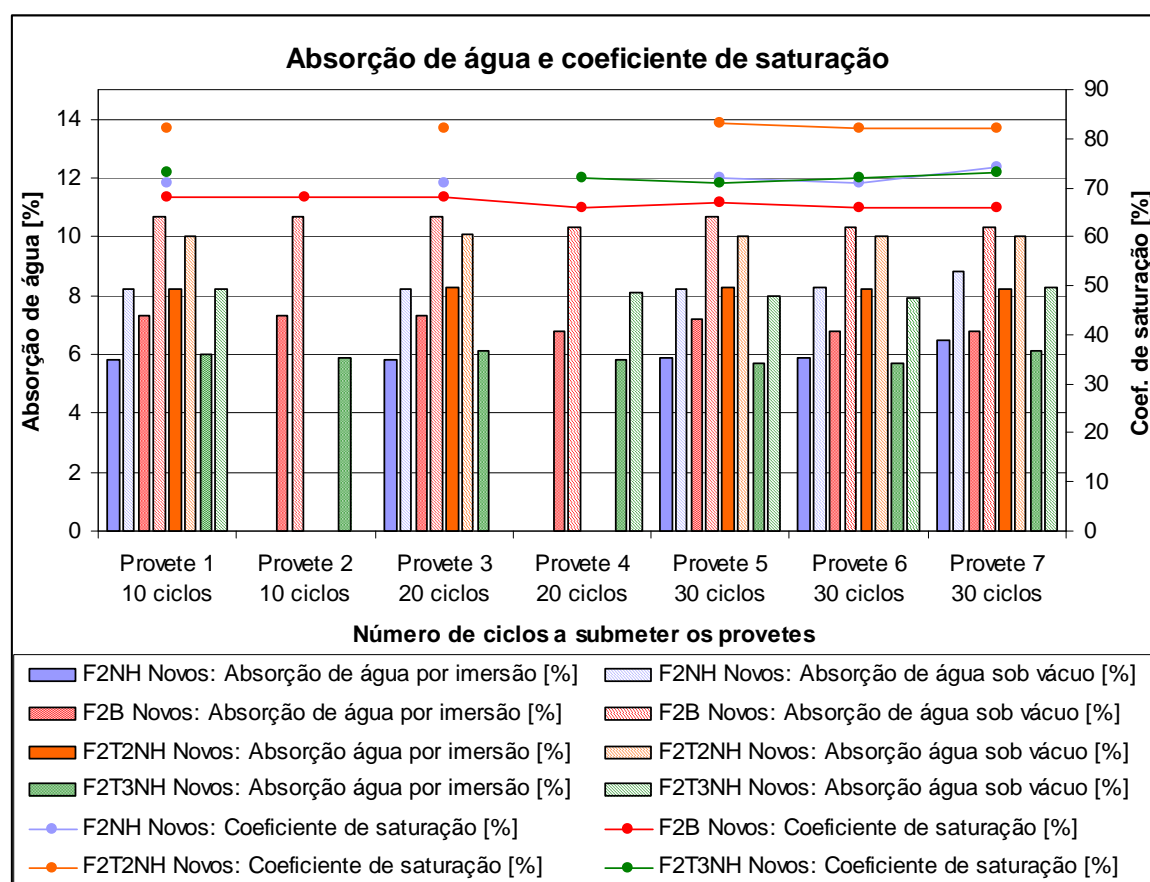


Figura 48 - Coeficiente de saturação dos provetes do fabricante 2 (gráfico global)

O coeficiente de saturação dá-nos a percentagem de poros preenchidos com água após imersão em água durante 48 horas face à totalidade dos poros abertos, que são preenchidos pela acção da água sob vácuo.

Na Figura 49 é apresentado o gráfico com os valores médios das absorções de água, do coeficiente de saturação e da porosidade aberta de todos os tipos de provetes não hidrofugados dos dois fabricantes.

Os valores médios do coeficiente de saturação variam entre os 84 % das telhas vermelhas do fabricante 1 (F1 NH) e os 67 % das telhas brancas do fabricante 2 (F2 B).

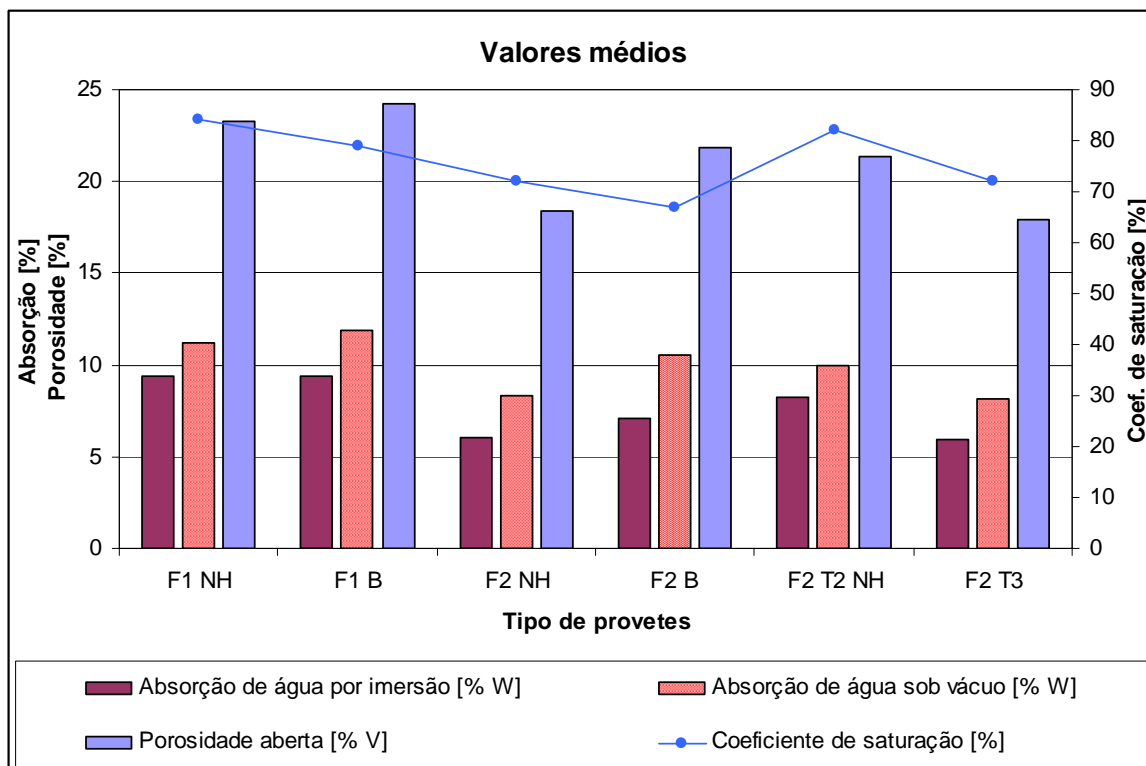


Figura 49 - Valores médios das absorções de água, do coeficiente de saturação e da porosidade aberta

Nos provetes do fabricante 1 as telhas brancas (F1 B) têm menor coeficiente de saturação porque a sua absorção de água por imersão é igual à das telhas vermelhas (F1 NH) e a absorção de água sob vácuo é superior.

No fabricante 2 o maior coeficiente de saturação encontra-se nos provetes vermelhos do modelo 2 (F2 T2 NH). Estes provetes têm a maior absorção de água por imersão e a segunda maior absorção de água sob vácuo.

O Quadro 34 apresenta os tipos de provetes ordenados por sequência crescente da temperatura de cozedura, por sequência decrescente das absorções de água e da porosidade aberta, por sequência crescente da massa volúmica aparente e por sequência decrescente do coeficiente de saturação.

Quadro 34 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, da absorção de água, da porosidade, da massa volúmica e do coeficiente de saturação

Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B
Absorção de água por imersão	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH
Absorção de água sob vácuo	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH
Porosidade aberta	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH
Massa volúmica aparente	Crescente	F1 B	F1 NH F2 B	–	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH
Coeficiente de saturação	Decrescente	F1 NH	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 T3 NH	–	F2 B

Entre os quatro tipos de provetes do fabricante 2 ensaiados, os provetes brancos (F2 B) têm menor coeficiente de saturação. Os provetes deste tipo, apesar de terem a segunda maior absorção de água por imersão, são os que têm maior absorção de água sob vácuo.

Os provetes vermelhos do modelo 1 (F2 NH) e do modelo 3 (F2 T3 NH) do fabricante 2 têm o mesmo coeficiente de saturação médio.

O Quadro 34 evidencia que não existe uma relação entre a sequência decrescente do coeficiente de saturação e as sequências das outras características dos provetes.

5.3.5 Absorção de água por contacto superficial de esponja

Após secagem a 60 °C até massa constante e arrefecimento, os provetes novos foram sujeitos ao contacto de uma esponja molhada.

A esponja foi humedecida com 5 ml de água destilada e logo de seguida foi colocada sobre a face superior do provete, na zona correspondente à aba da telha. Sobre a esponja foi colocada uma certa massa com o objectivo de promover o contacto completo entre a esponja e a superfície do provete.

Após 30 segundos a esponja foi retirada, pesada e voltou a ser colocada no mesmo local da superfície do provete. Foram novamente realizadas pesagens ao fim de 60 segundos, 120 segundos e 180 segundos de contacto entre a esponja e o provete.

Por diferença de massas relativamente à massa inicial da esponja húmida obtiveram-se as massas de água absorvida pelos provetes após as quatro durações do contacto. Foram então traçados os gráficos da absorção de água em função da raiz quadrada do tempo de contacto e obtidas por regressão linear as rectas que melhor se aproximam dos pontos obtidos. A partir das rectas foi calculada a massa de água absorvida (g) ao fim de 2 minutos de contacto.

Na Figura 50 podem ver-se aspectos do ensaio de absorção de água dos provetes por contacto superficial de esponja.



Figura 50 - Ensaio de absorção de água por contacto superficial de esponja

No Quadro 35 são apresentados os valores da massa de água absorvida pelos provetes novos do fabricante 1 determinados ao fim de 30 segundos, 60 segundos, 120 segundos e 180 segundos de contacto da esponja com os provetes. O valor da massa de água absorvida ao fim de 2 minutos, calculado a partir daqueles valores, é apresentado no Quadro 35 e no gráfico da Figura 51.

Quadro 35 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes do fabricante 1

Nº de ciclos a submeter os prov.	Provetes novos	Água absorvida após contacto da esponja durante:				Água absorvida após 2 minutos (cálculo)
		30 segundos	60 segundos	120 segundos	180 segundos	
		[g]	[g]	[g]	[g]	
10	F1 NH 6 C	0,51	0,74	1,06	1,32	1,07
20	F1NH14 C	0,53	0,77	1,10	1,40	1,12
30	F1 NH 5 C	0,54	0,78	1,09	1,37	1,11
	F1 NH 9 C	0,51	0,73	1,05	1,32	1,06
	F1 NH10 C	0,58	0,83	1,19	1,49	1,20
Média de 3 prov.	F1 NH C					1,12
Média de 5 prov.	F1 NH C					1,11
10	F1 B 9 C	0,43	0,61	0,84	1,02	0,84
20	F1 B 13 C	0,33	0,49	0,66	0,81	0,66
30	F1 B 6 C	0,36	0,52	0,71	0,85	0,70
	F1 B 7 C	0,37	0,55	0,74	0,89	0,74
	F1 B 17 C	0,38	–	0,71	0,85	0,71
Média de 3	F1 B C					0,72
Média de 5	F1 B C					0,73
10	F1 H 6 C	0,04	0,05	0,06	0,08	0,07
30	F1 H 7 C	0,05	0,05	0,07	0,08	0,07
	F1 H 8 C	0,05	0,06	0,06	0,08	0,07
Média de 2	F1 H C					0,07
Média de 3	F1 H C					0,07

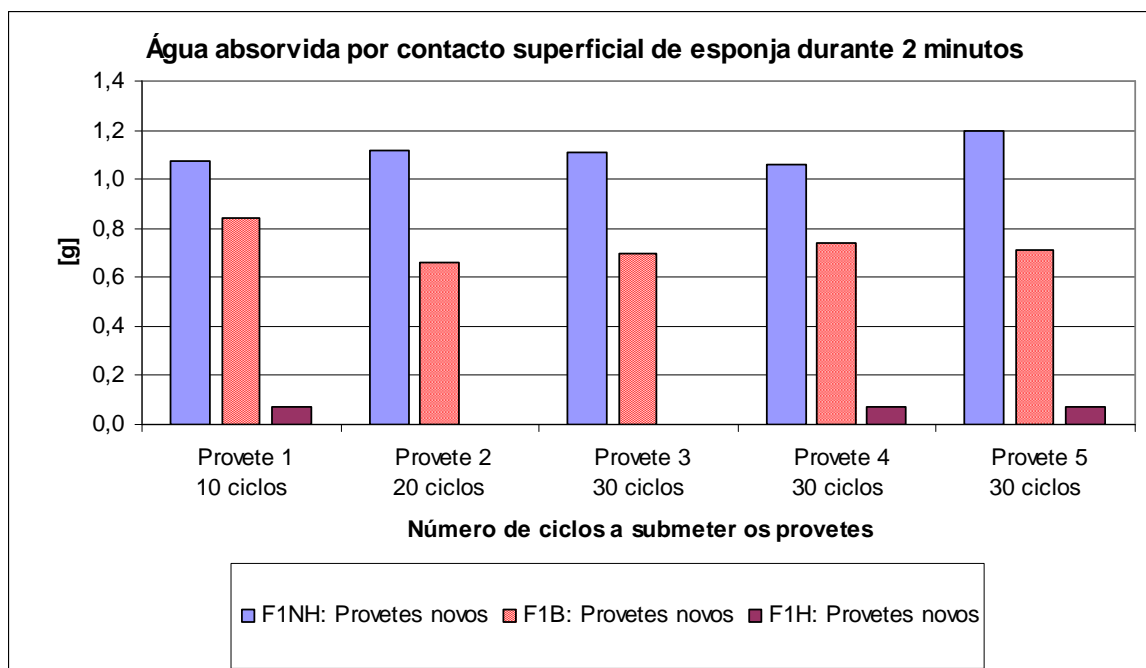


Figura 51 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes do fabricante 1

No Quadro 35 e na Figura 51 verifica-se que os três provetes hidrofugados ensaiados (F1 H) não absorveram praticamente água nenhuma. Durante o ensaio observou-se água não absorvida acumulada à superfície dos provetes no local de contacto da esponja.

Os três provetes F1 H apresentaram resultados idênticos, o que não acontece na sua absorção de água por imersão. Isto quer dizer que na zona da aba ensaiada o hidrofugante tem a mesma eficácia nos três provetes, o que não acontecerá em cada provete na totalidade da sua superfície.

No Quadro 36 e no Quadro 37 são apresentados os valores da massa de água absorvida pelos provetes novos do fabricante 2 determinados ao fim de 30 segundos, 60 segundos, 120 segundos e 180 segundos de contacto da esponja com os provetes. O valor da massa de água absorvida ao fim de 2 minutos, calculado a partir daqueles valores é apresentado no Quadro 36, no Quadro 37, na Figura 52 e na Figura 53.

Quadro 36 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2

Nº de ciclos a submeter os prov.	Provetes novos	Água absorvida após contacto da esponja durante:				Água absorvida após 2 minutos (cálculo) [g]
		30 segundos	60 segundos	120 segundos	180 segundos	
		[g]	[g]	[g]	[g]	
10	F2 NH 8 C	0,17	0,24	0,32	0,40	0,33
20	F2 NH 9 C	0,18	0,25	0,36	0,45	0,36
30	F2 NH 4 C	0,23	0,32	0,43	0,52	0,43
	F2 NH 5 C	0,20	0,29	0,39	0,48	0,39
	F2 NH 11 C	0,21	0,30	0,41	0,50	0,41
Média de 3 prov.	F2 NH C					0,41
Média de 5 prov.	F2 NH C					0,38
10	F2 B 7 C	0,22	0,31	0,42	0,51	0,42
	F2 B 8 C	0,23	0,31	0,41	0,50	0,42
20	F2 B 6 C	0,25	0,33	0,42	0,52	0,43
	F2 B 9 C	0,22	—	0,36	0,44	0,37
30	F2 B 5 C	0,21	0,30	0,42	0,50	0,41
	F2 B 10 C	0,20	—	0,35	0,45	0,37
	F2 B 11 C	0,20	0,30	0,39	0,48	0,39
Média de 3 prov.	F2 B C					0,39
Média de 7 prov.	F2 B C					0,40
10	F2 H 7 C	0,03	0,04	0,05	0,06	0,05
20	F2 H 5 C	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05
30	F2 H 3 C	0,03	0,04	0,05	0,06	0,05
	F2 H 6 C	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06
	F2 H 8 C	0,03	0,04	0,05	0,07	0,05
Média de 3 prov.	F2 H C					0,05
Média de 5 prov.	F2 H C					0,05

Quadro 37 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2

Nº de ciclos a submeter os prov.	Provetes novos	Água absorvida após contacto da esponja durante:				Água absorvida após 2 minutos (cálculo) [g]
		30 segundos	60 segundos	120 segundos	180 segundos	
		[g]	[g]	[g]	[g]	
10	F2 T2 NH 5C	0,25	0,39	0,52	0,65	0,53
20	F2 T2 NH 3C	0,26	0,38	0,53	0,66	0,53
30	F2 T2 NH 6C	0,27	0,37	0,52	0,64	0,52
	F2 T2NH10C	0,25	0,38	0,54	0,65	0,53
	F2 T2NH11C	0,25	0,37	0,52	0,65	0,52
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 T2 NH C					0,52
Média de 5 prov.	F2 T2 NH C					0,53
10	F2 T3 NH 8C	0,15	0,22	0,33	0,41	0,33
	F2 T3NH10C	0,14	0,20	0,28	0,36	0,28
20	F2 T3NH11C	0,14	0,21	0,30	0,37	0,30
	F2 T3NH12C	0,13	0,19	0,28	0,36	0,29
30	F2 T3 NH 3C	0,12	0,18	0,24	0,30	0,25
	F2 T3 NH 4C	0,13	0,18	0,26	0,32	0,26
	F2 T3 NH 6C	0,14	0,22	0,33	0,41	0,33
Média de 3 prov.	F2 T3 NH C					0,28
Média de 7 prov.	F2 T3 NH C					0,29

Os provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H) não absorveram praticamente água nenhuma, tal como os provetes do mesmo tipo do fabricante 1. Também nos provetes F2 H se observou, durante o ensaio, água não absorvida acumulada à sua superfície no local de contacto da esponja.

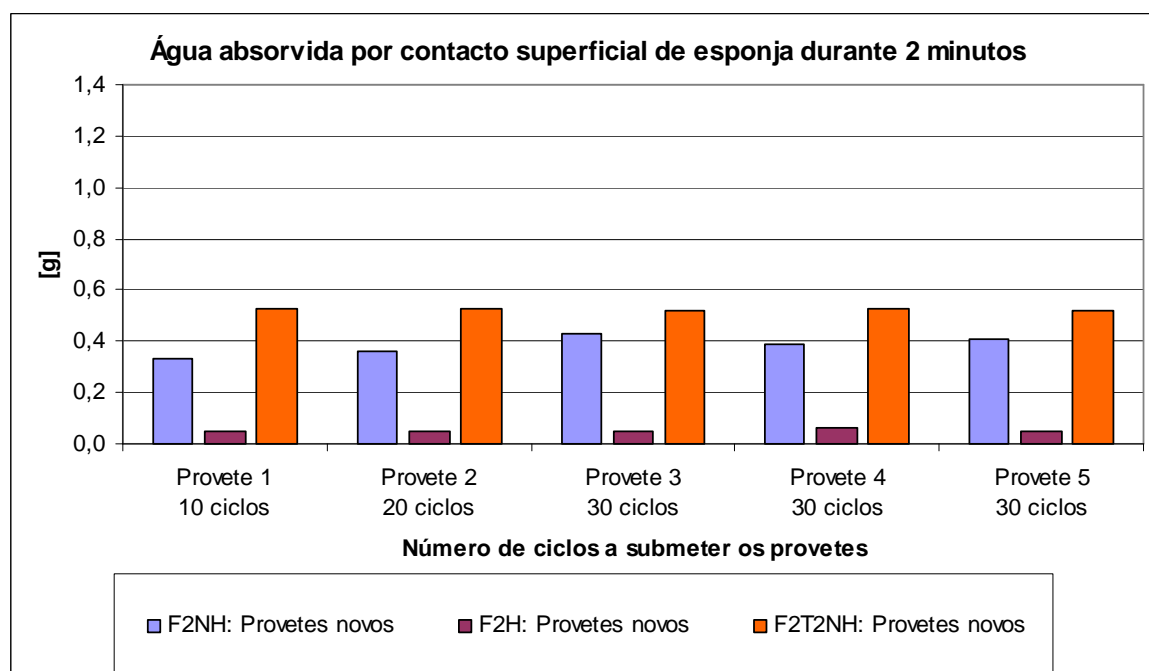


Figura 52 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2

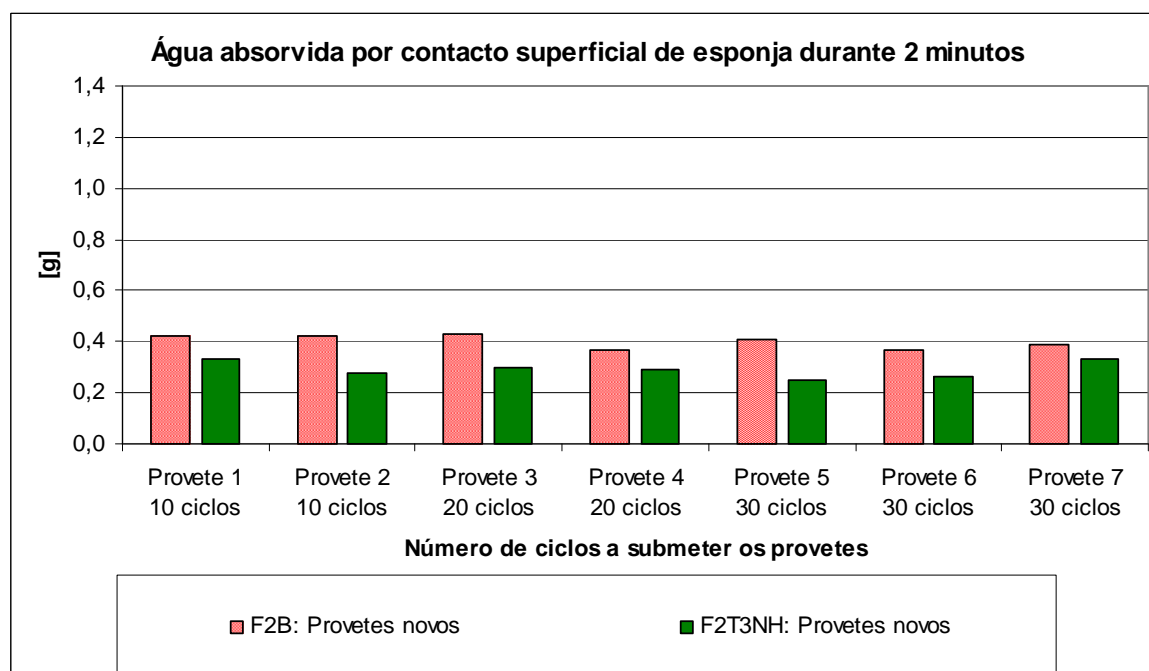


Figura 53 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

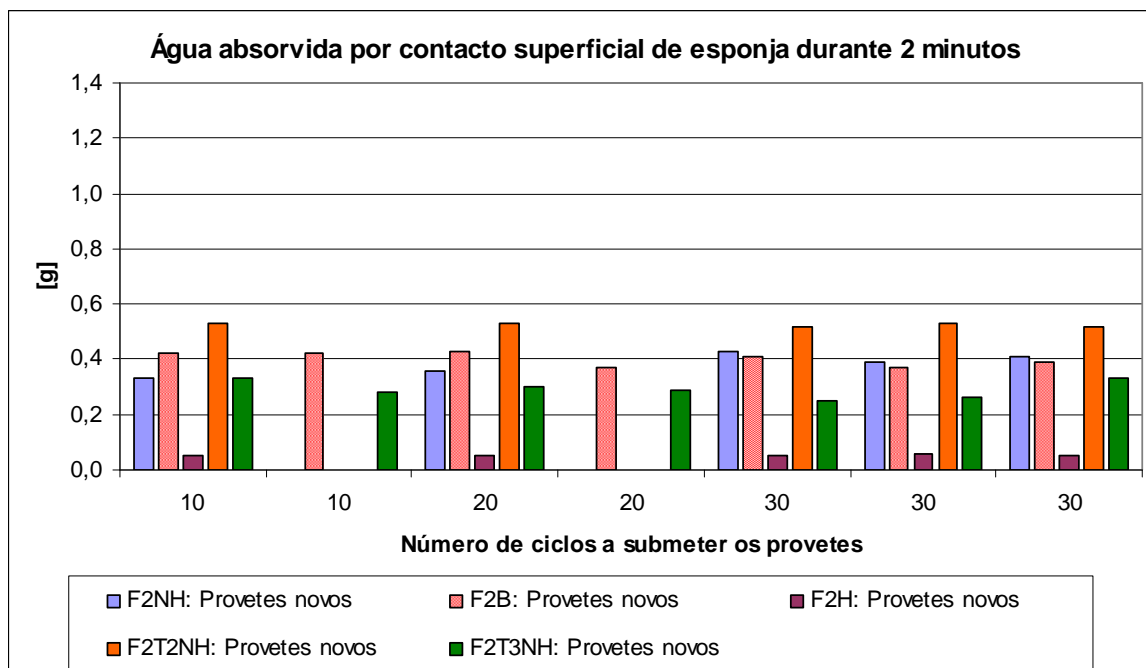


Figura 54 - Água absorvida por contacto superficial de esponja pelos provetes do fabricante 2 (gráfico global)

A Figura 54 apresenta o gráfico global com os valores da massa de água absorvida ao fim de 2 minutos pelos provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2.

Na Figura 55 é apresentado o gráfico com os valores médios das absorções de água, da porosidade aberta e da massa de água absorvida ao fim de 2 minutos de contacto de esponja de todos os tipos de provetes não hidrofugados dos dois fabricantes.

O Quadro 38 apresenta os tipos de provetes ordenados por sequência crescente da temperatura de cozedura, por sequência decrescente das absorções de água e da porosidade aberta, por sequência crescente da massa volúmica aparente e por sequência decrescente do coeficiente de saturação e da água absorvida após 2 minutos de contacto de esponja.

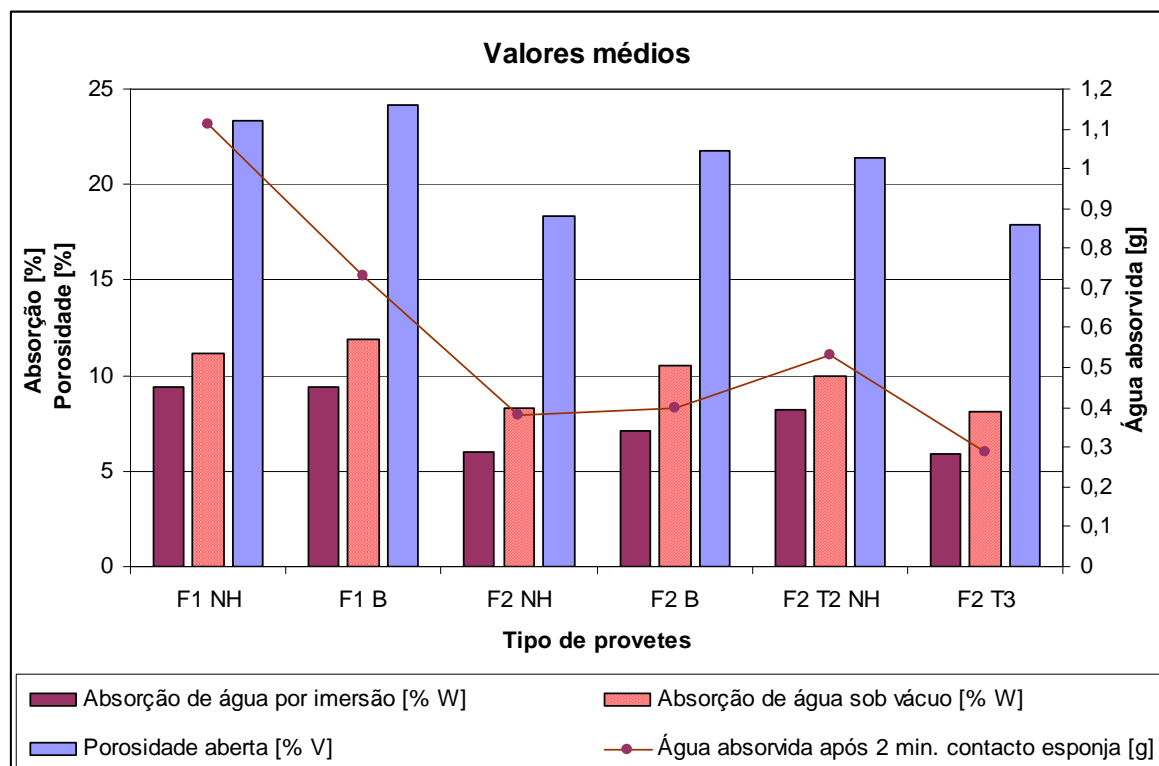


Figura 55 - Valores médios das absorções de água, da porosidade aberta e da água absorvida por contacto de esponja

Quadro 38 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, absorção de água, porosidade, massa volúmica, coeficiente de saturação e água absorvida após contacto de esponja

Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–
Absorção de água por imersão	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H
Absorção de água sob vácuo	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Porosidade aberta	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Massa volúmica aparente	Crescente	F1 B	F1 NH F2 B	–	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Coeficiente de saturação	Decrescente	F1 NH	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 T3 NH	–	F2 B	–	–
Água absorvida após 2 min. de contacto de esponja	Decrescente	F1 NH	F1 B	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H

A sequência dos tipos de provetes ordenados pelo valor decrescente da água absorvida após 2 minutos de contacto de esponja é exactamente igual à sequência ordenada pelo valor decrescente da absorção de água por imersão em água fria à pressão atmosférica. Portanto os provetes com maior absorção de água por imersão são os que apresentaram maior quantidade de água absorvida por contacto superficial de esponja.

No entanto, como é bem visível no gráfico da Figura 55, a relação entre a absorção de água por imersão dos vários tipos de provetes é diferente da relação entre os seus valores da absorção de água por contacto de esponja, não sendo portanto proporcionais estas duas características.

A relação entre as características hídricas superficiais dos diversos tipos de provetes é diferente da relação entre as características hídricas dos vários materiais. A taxa de absorção de água inicial também varia com o tipo de provetes de forma diferente da absorção de água após 48 horas de imersão.

Assim, apesar da absorção de água por imersão dos provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) ser igual à absorção dos provetes vermelhos (F1 NH), a absorção de água por contacto superficial de esponja dos provetes F1 B é muito inferior à dos provetes F1 NH. Estes provetes são fabricados com o mesmo tipo de molde, variando as matérias-primas e a temperatura de cozedura.

No caso do fabricante 2 os provetes F2 T2 NH têm o maior valor dos dois tipos de absorção e os provetes F2 T3 NH o menor valor. A relação entre as absorções por imersão destes dois tipos de provetes também é inferior à relação entre os valores da água absorvida por contacto de esponja. Estes dois modelos são fabricados com moldes e temperatura de cozedura diferentes.

Já entre os provetes vermelhos do modelo 1 (F2 NH) e brancos do mesmo modelo e fabricante (F2 B), a absorção de água por imersão varia mais do que a absorção de água por contacto superficial de esponja. Estes provetes são fabricados com o mesmo tipo de molde, variando as matérias-primas e a temperatura de cozedura.

5.3.6 Velocidade de propagação de ultra-sons - método indirecto

A velocidade de propagação de ultra-sons foi determinada usando o método de transmissão indirecta descrito na versão portuguesa da norma europeia NP EN 14579 [70]. Neste método os transdutores são colocados na mesma face do provete. O transmissor de ultra-sons é colocado na origem e o receptor é colocado em vários pontos ao longo de uma linha da superfície, sendo realizadas leituras em cada ponto.

Os transdutores foram colocados de modo a fazer um ângulo de cerca de 45° com a superfície do provete (Figura 56).

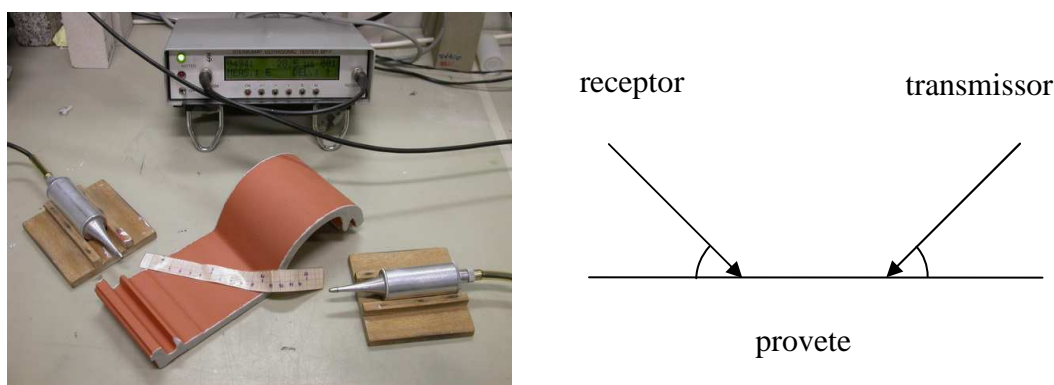


Figura 56 - Aparelho e esquema para determinação da velocidade de propagação de ultra-sons

Os provetes foram secos à temperatura de 60°C em estufa ventilada, até massa constante, para obtenção da massa seca inicial, e de seguida foram sujeitos ao ensaio de propagação de ultra-sons. No ensaio foram usados transdutores exponenciais acoplados ao equipamento modelo BP7 da STEINKAMP, apresentado na Figura 56.

Os provetes utilizados permitiram fazer 9 medições, com os transdutores afastados de 1 a 9 cm. A cada distância foi medido o tempo de transmissão. A velocidade de transmissão de ultra-sons é a inclinação da recta que melhor se aproxima dos pontos 1 a 9, marcados em gráficos distância-tempo.

No Quadro 39 e no gráfico da Figura 57 são apresentados os valores da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes novos do fabricante 1.

No gráfico da Figura 58, no Quadro 40 e no Quadro 41 são apresentados os valores da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes novos do fabricante 2.

Os valores 10, 20 e 30 nos gráficos correspondem ao número de ciclos de nevoeiro salino/secagem a que os provetes vão ser posteriormente sujeitos.

Quadro 39 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Velocidade de propagação de ultra-sons V_p [m/s]
10	F1 NH 6 B	2780
20	F1 NH 14 B	2600
30	F1 NH 5 B F1 NH 9 B F1 NH 10 B	2770 2700 2580
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F1 NH	2680
Média de 5 provetes	F1 NH	2690
10	F1 B 9 B	3100
20	F1 B 13 B	3330
30	F1 B 6 B F1 B 7 B F1 B 17 B	3270 3230 3260
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F1 B	3250
Média de 5 provetes	F1 B	3240
10	F1 H 6 B	2720
20	F1 H 3 B	2520
30	F1 H 5 B F1 H 7 B F1 H 8 B	2790 2660 2790
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F1 H	2750
Média de 5 provetes	F1 H	2700

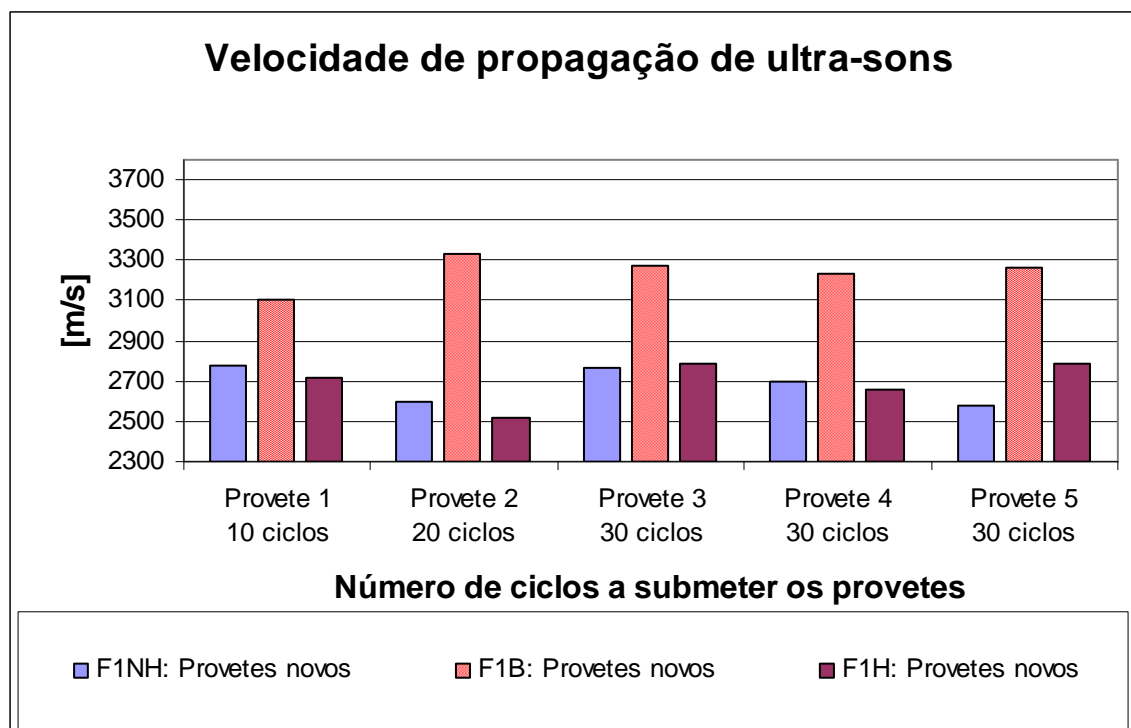


Figura 57 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes novos do fabricante 1

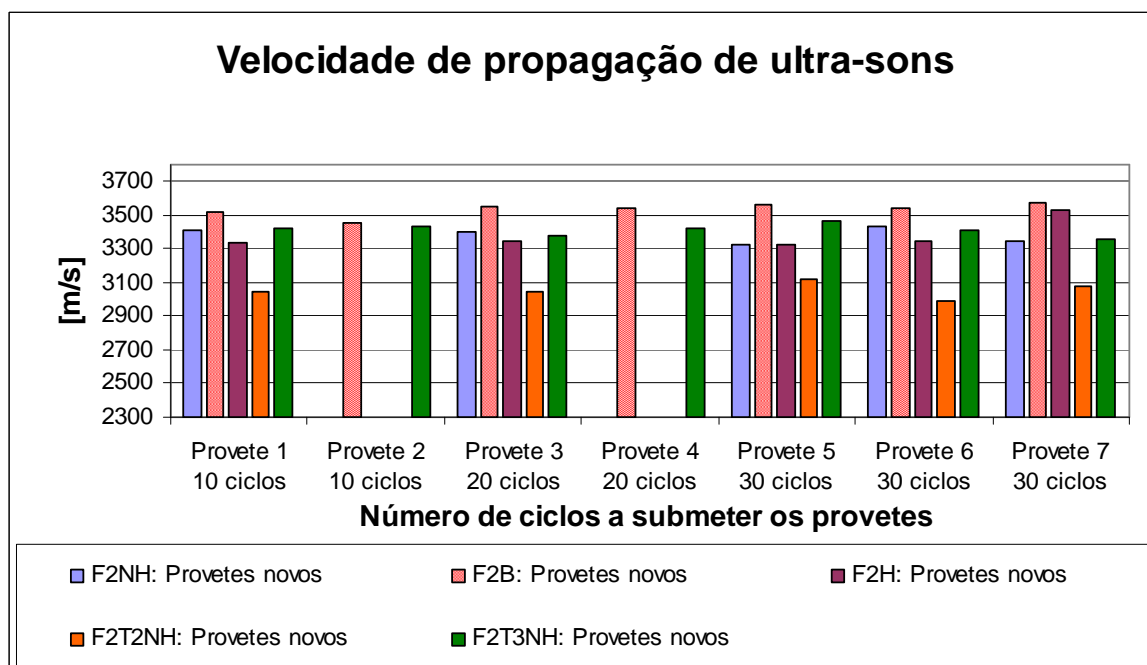


Figura 58 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes novos do fabricante 2

Quadro 40 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Velocidade de propagação de ultra-sons V_p [m/s]
10	F2 NH 8 C	3410
20	F2 NH 9 C	3400
30	F2 NH 4 C F2 NH 5 C F2 NH 11 C	3330 3430 3350
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 NH	3370
Média de 5 provetes	F2 NH	3380
10	F2 B 7 C F2 B 8 C	3520 3460
20	F2 B 6 C F2 B 9 C	3550 3540
30	F2 B 5 C F2 B 10 C F2 B 11 C	3560 3540 3570
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 B	3560
Média de 7 provetes	F2 B	3530
10	F2 H 7 C	3340
20	F2 H 5 C	3350
30	F2 H 3 C F2 H 6 C F2 H 8 C	3320 3350 3530
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 H	3400
Média de 5 provetes	F2 H	3380

Quadro 41 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2

Número de ciclos a submeter os provetes	Provetes novos	Velocidade de propagação de ultra-sons V_p [m/s]
10	F2 T2 NH 5 C	3040
20	F2 T2 NH 3 C	3040
30	F2 T2 NH 6 C F2 T2 NH 10 C F2 T2 NH 11 C	3120 2990 3080
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 T2 NH	3060
Média de 5 provetes	F2 T2 NH	3050
10	F2 T3 NH 8 C F2 T3 NH 10 C	3420 3430
20	F2 T3 NH 11 C F2 T3 NH 12 C	3380 3420
30	F2 T3 NH 3 C F2 T3 NH 4 C F2 T3 NH 6 C	3470 3410 3360
Média de 3 prov. a submeter a 30 ciclos	F2 T3 NH	3410
Média de 7 provetes	F2 T3 NH	3410

Na Figura 59 é apresentado o gráfico com os valores médios das absorções de água, da porosidade aberta, da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação de ultra-sons de todos os tipos de provetes dos dois fabricantes.

A velocidade de transmissão de ultra-sons nos provetes hidrofugados (F1 H e F2 H) é igual à velocidade de propagação nos provetes hidrofugados do mesmo fabricante e do mesmo modelo (F1 NH e F2 NH). Como foi referido as telhas hidrofugadas de cada fabricante são telhas do mesmo modelo que no fim do processo de fabrico são imersas no produto hidrofugante.

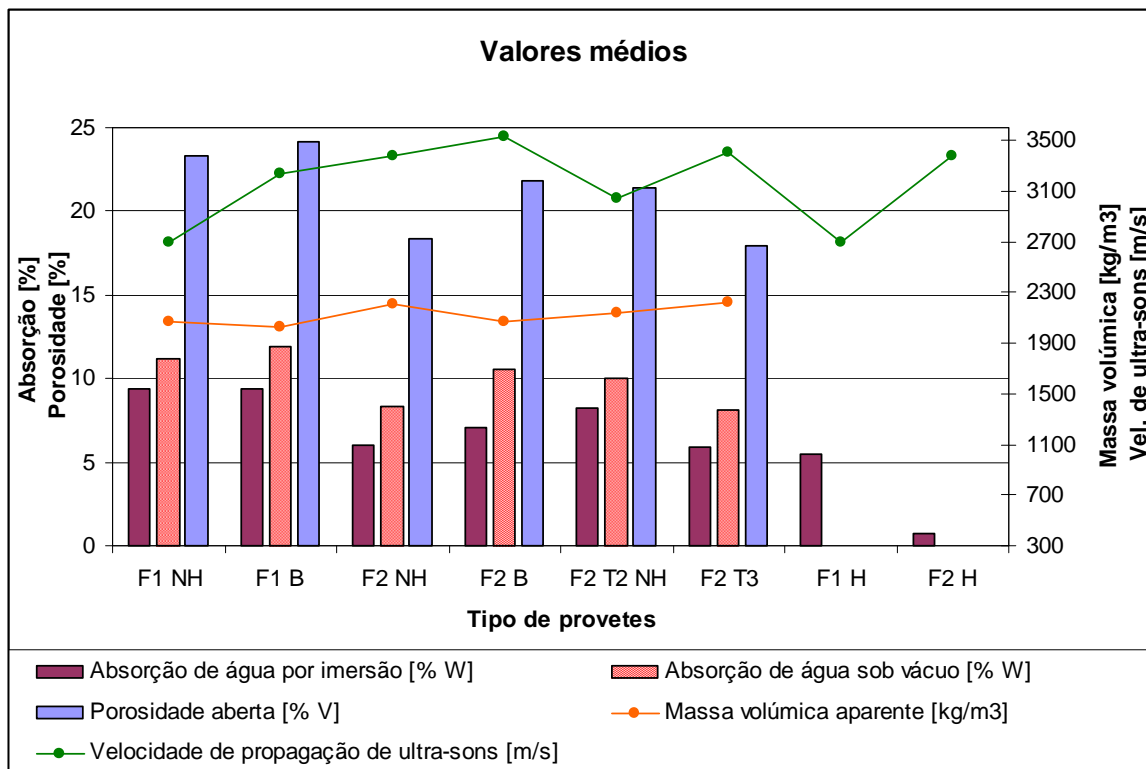


Figura 59 - Valores médios das absorções de água, da porosidade aberta, da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação de ultra-sons

Quadro 42 - Ordenação dos tipos de provetes por sequência da temperatura de cozedura, absorção de água, porosidade, massa volúmica, coeficiente de saturação, água absorvida após contacto de esponja e velocidade de propagação de ultra-sons

Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–
Absorção de água por imersão	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H
Absorção de água sob vácuo	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Porosidade aberta	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Massa volúmica aparente	Crescente	F1 B	F1 NH F2 B	–	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
Coeficiente de saturação	Decrescente	F1 NH	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 T3 NH	–	F2 B	–	–
Água absorvida após 2 min. de contacto de esponja	Decrescente	F1 NH	F1 B	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H
Vel. de propagação de ultra-sons	Crescente	F1 NH F1 H	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–

O Quadro 42 apresenta os tipos de provetes ordenados por sequência crescente da temperatura de cozedura, da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação de ultra-sons e por sequência decrescente das absorções de água, da porosidade aberta, do coeficiente de saturação e da água absorvida após 2 minutos de contacto de esponja.

Em cada um dos fabricantes, os provetes brancos apresentam maior valor de velocidade de propagação do que os provetes vermelhos.

Nos provetes vermelhos dos dois fabricantes às sequências decrescentes das absorções de água e da porosidade aberta correspondem sequências crescentes da massa volúmica aparente e da velocidade de propagação de ultra-sons. Portanto os provetes vermelhos cujo material tem maior compacidade, expressa por maior massa volúmica e menores porosidade e absorções de água, são os que apresentam maior velocidade de propagação de ultra-sons.

Também entre os provetes brancos dos dois fabricantes (F1 B e F2 B) os que apresentam maior velocidade de propagação de ultra-sons (F2 B) têm menores absorções de água e porosidade e maior massa volúmica aparente.

A maior velocidade de propagação de todos os tipos de provetes ocorre nos provetes brancos do fabricante 2 (F2 B) e a menor velocidade de propagação nos provetes vermelhos hidrofugados e não hidrofugados do fabricante 1 (F1 NH e F1 H).

A sequência crescente da velocidade de transmissão dos provetes não hidrofugados é exactamente igual à sequência decrescente do coeficiente de saturação do mesmo tipo de provetes.

5.3.7 Porosimetria de mercúrio

De alguns tipos de telhas foram retirados provetes que foram submetidos ao ensaio de porosimetria de mercúrio baseado na norma norte-americana ASTM D 4404 [68], para determinar a sua estrutura porosa.

Os provetes ensaiados foram retirados de telhas novas das quais foram também obtidos os provetes submetidos ao envelhecimento acelerado.

O ensaio foi realizado num porosímetro de mercúrio marca Quantachrome, modelo Autoscan 60.

Os provetes foram secos em estufa ventilada a 60 °C e de seguida arrefecidos em exsiccador. Após serem partidos, para caberem na célula de ensaio (penetrómetro), foram colocados no porosímetro de mercúrio.

O ensaio foi constituído pelas seguintes operações: degasificação do provete, enchimento da célula de ensaio com mercúrio e pressurização.

Os parâmetros de ensaio foram os seguintes:

γ - tensão superficial do mercúrio: 0,480 N/m

θ - ângulo de contacto entre o mercúrio e a parede do poro: 147,10°

Densidade do mercúrio 13,5340 g/cm³

Célula de 5,3 cm³

Apresenta-se na Figura 60 o resultado do ensaio na forma de um gráfico com as curvas de distribuição das dimensões dos poros.

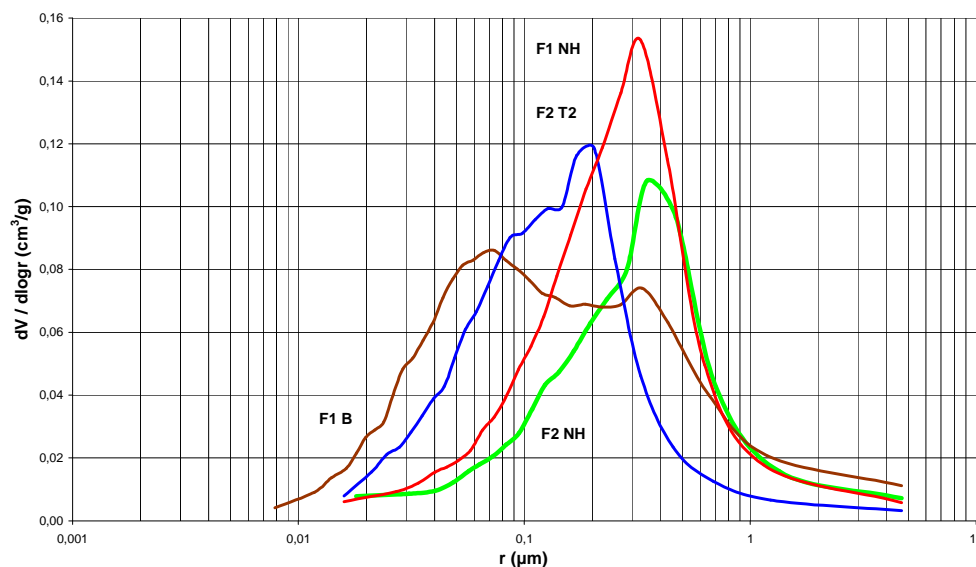


Figura 60 - Porosimetria de mercúrio de provetes novos

Os resultados obtidos mostram algumas diferenças entre os diversos tipos de materiais. As telhas vermelhas do modelo 1 de cada um dos dois fabricantes (F1 NH e F2 NH) apresentam poros maiores do que os outros tipos de telhas, já que as suas curvas de distribuição estão deslocadas para a direita relativamente às outras curvas. Os provetes F1 NH e F2 NH têm predominância de poros com raio da ordem dos 0,2 μm a 0,5 μm e o intervalo de dimensões de poros é menor nestes provetes porque as suas curvas são mais apertadas.

As telhas vermelhas do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH) têm poros de menor dimensão do que as outras telhas vermelhas, da ordem de 0,1 μm a 0,3 μm .

As telhas brancas do fabricante 1 (F1 B) apresentam um intervalo maior de dimensões de poros e são as únicas com uma estrutura porosa claramente bimodal. Estas telhas têm predominância de poros mais pequenos, com raio da ordem de 0,05 μm a 0,09 μm , mas também apresentam alguns poros maiores, com raio da ordem de 0,2 μm a 0,4 μm .

5.3.8 Análise comparada das características de provetes novos

Os oito tipos de provetes foram caracterizados através da realização de diversos ensaios para tentar avaliar diferenças que poderão ajudar a explicar diferentes comportamentos face aos ensaios de envelhecimento acelerado e posteriormente identificar parâmetros que contribuam para a menor degradação das telhas. Os resultados mostraram que os vários tipos de telhas donde se extraíram os provetes têm características diferentes.

No Quadro 43 apresentam-se os tipos de provetes e os valores de quase todas as características determinadas, ordenados por sequências crescentes ou decrescentes.

Quadro 43 - Características médias dos tipos de provetes

Característica	Ordenação	Tipo de provetes e valores							
Temperatura de cozedura	Crescente	F1 NH F1 H	F1 B	F2 T2 NH	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–
Absorção de água por imersão [%]	Decrescente	F1 NH F1 B	–	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H
		9,4	–	8,2	7,1	6,0	5,9	5,5	0,7
Absorção de água sob vácuo [%]	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
		11,9	11,2	10,5	10,0	8,3	8,1	–	–
Porosidade aberta [%]	Decrescente	F1 B	F1 NH	F2 B	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
		24,2	23,3	21,8	21,4	18,4	17,9	–	–
Massa volúmica aparente [kg/m ³]	Crescente	F1 B	F1 NH F2 B	–	F2 T2 NH	F2 NH	F2 T3 NH	–	–
		2030	2070	–	2140	2210	2220	–	–
Coeficiente de saturação [%]	Decrescente	F1 NH	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 T3 NH	–	F2 B	–	–
		84	82	79	72	–	67	–	–
Água absorvida após 2 min. de contacto de esponja [g]	Decrescente	F1 NH	F1 B	F2 T2 NH	F2 B	F2 NH	F2 T3 NH	F1H	F2H
		1,11	0,73	0,53	0,40	0,38	0,29	0,07	0,05
Velocidade de propagação de ultra-sons [m/s]	Crescente	F1 NH F1 H	F2 T2 NH	F1 B	F2 NH F2 H	F2 T3 NH	F2 B	–	–
		2690 2700	3050	3240	3380	3410	3530	–	–

Nos provetes vermelhos não hidrofugados dos dois fabricantes existe uma relação entre o aumento da temperatura de cozedura e a diminuição da sua absorção de água por imersão.

Isto não se verifica entre os provetes brancos e vermelhos não hidrofugados de cada fabricante. Assim, apesar da temperatura de cozedura dos provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) ser superior à dos provetes vermelhos (F1 NH), a absorção de água por imersão é igual. No fabricante 2 as telhas brancas são as que atingem maior temperatura de cozedura, no entanto têm maior absorção de água do que algumas das vermelhas (F2 NH, e F2 T3 NH). Nestes casos a absorção de água das telhas também será influenciada por outros parâmetros de cozedura como os diferentes tipos de matérias-primas.

Ambas as telhas não hidrofugadas do fabricante 1 têm a mesma absorção de água por imersão. Nas telhas do fabricante 2 as designadas F2 T2 NH têm a maior absorção de água por imersão e as F2 T3 NH o menor valor desta característica.

Claro que apesar da temperatura de cozedura dos provetes hidrofugados ser igual à temperatura de cozedura dos provetes não hidrofugados correspondentes, os provetes hidrofugados têm uma absorção de água muito inferior. A diferença da absorção de água é superior entre os provetes hidrofugados / provetes não hidrofugados do fabricante 2 do que entre os do fabricante 1, indicando que a hidrofugação dos provetes do fabricante 2 é mais eficaz.

À diminuição da absorção de água sob vácuo e da porosidade aberta corresponde um aumento da massa volúmica aparente, sendo iguais as respectivas sequências dos tipos de provetes.

Esta correspondência nem sempre acontece entre estas três propriedades e a absorção de água por imersão, como se pode ver no Quadro 43 e na Figura 44. Assim, no caso das telhas do fabricante 1, os provetes brancos (F1 B) têm maiores absorção de água sob vácuo e porosidade aberta e menor massa volúmica aparente do que os vermelhos (F1 NH), apesar de terem a mesma absorção de água por imersão. No fabricante 2 os provetes brancos (F2 B) são os que têm maiores absorção de água sob vácuo e porosidade aberta e

menor massa volúmica aparente, apesar da sua absorção de água por imersão ser inferior à dos provetes F2 T2 NH.

Para as duas condições de imersão, com e sem vácuo, os provetes não hidrofugados do fabricante 1 têm maior absorção de água do que os provetes do fabricante 2. As menores absorções de água por imersão e sob vácuo são as dos provetes F2 NH e F2 T3 NH.

Dando o coeficiente de saturação a indicação da maior ou menor facilidade do preenchimento dos poros abertos por imersão dos provetes em água à temperatura ambiente, verifica-se que após 48 horas de imersão ficam preenchidos 84 % dos poros abertos dos provetes F1 NH, cerca de 80 % dos poros abertos dos provetes F2 T2 NH e F1 B, 72 % dos poros abertos dos provetes F2 NH e F2 T3 NH e 67 % dos poros abertos dos provetes F2 B.

No ensaio de absorção de água por contacto de esponja foram obtidos valores da quantidade de água absorvida pelos provetes ao fim de 2 minutos. Verifica-se que a sequência do tipo de provetes ordenados pelos valores decrescentes desta característica é igual à sequência decrescente da absorção de água por imersão. No entanto, como já foi discutido em 5.3.5, a variação de uma destas características não é proporcional à variação da outra. Isto poderá ser explicado por características hídricas superficiais distintas, que influenciam a taxa inicial de absorção de água, enquanto os valores da absorção ao fim de 48 horas de imersão em água serão condicionados pelas propriedades hídricas dos materiais dos provetes, tendo as características hídricas superficiais menor influência. Os diferentes tipos de moldes utilizados no fabrico das telhas determinam diferenças nas suas superfícies.

Também é de referir que em todos provetes hidrofugados ensaiados observou-se água acumulada à superfície após o contacto da esponja, portanto não terão absorvido água. Isto indicia a eficácia do hidrofugante na zona da aba dos provetes ensaiados. No caso do fabricante 1 os provetes hidrofugados apresentaram diferentes valores da absorção de água por imersão, o que indica que a eficácia da hidrofugação não foi a mesma em todos os provetes e também não será a mesma em toda a superfície de cada provete.

As diversas velocidades de transmissão de ultra-sons obtidas nos provetes indicam que os diversos tipos de telhas têm diferentes características mecânicas.

Nos provetes vermelhos dos dois fabricantes a um aumento da compacidade, expressa pelo aumento da massa volúmica aparente e pela diminuição da porosidade e das absorções de água, corresponde um aumento da velocidade de transmissão de ultra-sons.

Em cada fabricante a velocidade de transmissão de ultra-sons é maior nos provetes brancos do que nos vermelhos, apesar de os brancos não terem menores absorções de água e porosidade e maior massa volúmica aparente do que os vermelhos do mesmo fabricante.

Considerando os provetes brancos dos dois fabricantes (F1 B e F2 B) a maior velocidade de transmissão de ultra-sons ocorre nos provetes F2 B, que têm maior massa volúmica aparente e menores absorções de água e porosidade do que os provetes brancos do fabricante 1.

A sequência crescente da velocidade de transmissão de ultra-sons dos provetes não hidrofugados é exactamente igual à sequência decrescente do coeficiente de saturação do mesmo tipo de provetes. Não existe correspondência entre esta sequência do coeficiente de saturação e as sequências das outras características, para além da velocidade de transmissão de ultra-sons.

A porosimetria de mercúrio mostrou que os quatro tipos de telhas ensaiados têm estruturas porosas diferentes. Os provetes F1 NH e F2 NH têm poros com dimensões maiores do que os dos provetes F1 B e F2 T2 NH. Os provetes F1 B e F2 T2 NH têm maior intervalo de dimensões dos poros do que os provetes F1 NH e F2 NH. Os provetes F1 B apresentam um intervalo maior de dimensões de poros e têm uma estrutura porosa bimodal, com predominância de poros pertencentes a dois intervalos de dimensões distintos.

5.4 Ensaio em câmara de nevoeiro salino

5.4.1 Introdução

Os ensaios foram realizados na câmara de nevoeiro salino apresentada na Figura 61 onde os provetes foram submetidos a nevoeiro e a secagem. Foram realizados ensaios de nevoeiro sem sal seguido de secagem, ensaios de nevoeiro salino seguido de secagem, ensaios cíclicos de nevoeiro salino/secagem com ciclos de 24 horas e ciclos de 48 horas e ensaios compostos constituídos por fases cíclicas de nevoeiro salino/secagem intercaladas por fases prolongadas de secagem.



Figura 61 - Câmara de nevoeiro salino

5.4.2 Ensaio contínuo de nevoeiro e secagem

5.4.2.1 Nevoeiro sem sal seguido de secagem

Três telhas inteiras, uma de cada um dos tipos de telhas do fabricante 1, foram colocadas numa estufa ventilada a 60 °C para determinação da massa seca. Depois foram alojadas dentro da câmara de nevoeiro salino (Figura 62) e sujeitas à acção de nevoeiro sem sal durante um período de tempo prolongado. A temperatura da câmara esteve programada para 35 °C.



Figura 62 - Telhas do fabricante 1 antes do ensaio de nevoeiro sem sal

As telhas foram pesadas várias vezes ao longo do ensaio, o que permitiu obter a variação ao longo do tempo da sua massa em relação à massa inicial seca, representada na Figura 63. As pesagens foram realizadas depois de deixar escorrer a água acumulada à superfície das telhas.

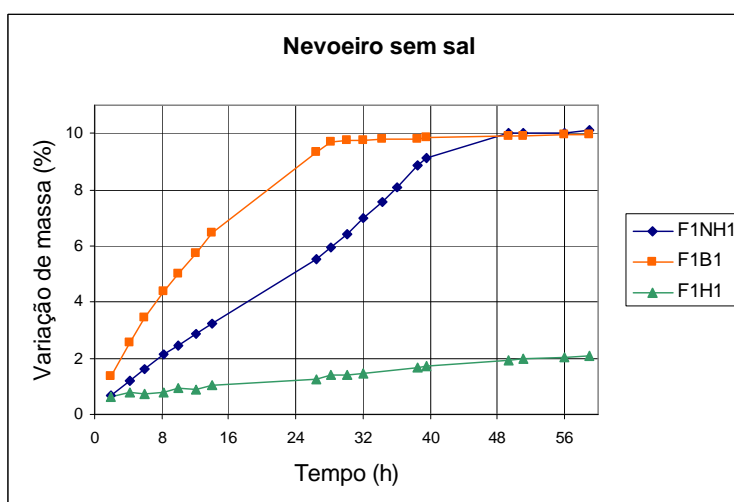


Figura 63 - Variação de massa de telhas do fabricante 1 sob nevoeiro sem sal durante 60 h

As telhas apresentam curvas de absorção diferentes. As telhas não hidrofugadas vermelha (F1 NH) e branca (F1 B) aumentaram de massa a uma taxa superior à da telha hidrofugada (F1 H). A variação de massa das telhas não hidrofugadas atingiu o valor de 10 % e

estabilizou durante a realização do ensaio, enquanto a massa da telha hidrofugada aumentou apenas 2 % e continuava a subir quando o ensaio terminou. A massa da telha branca aumentou mais rapidamente e estabilizou antes da massa da telha vermelha.

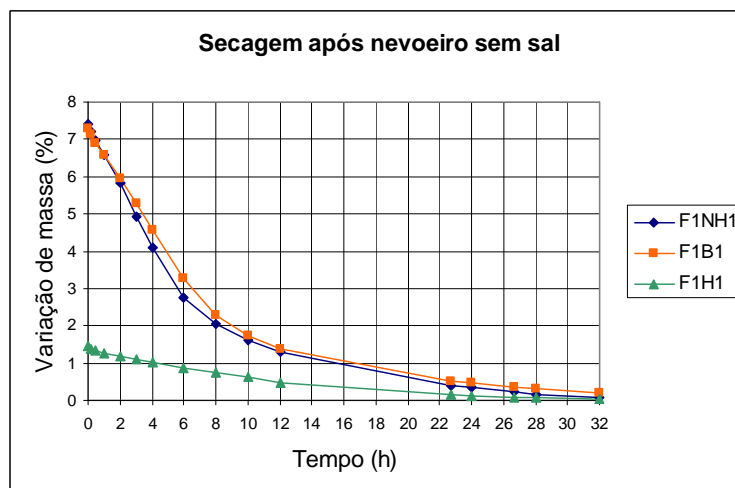


Figura 64 - Secagem a 35 °C de telhas do fabricante 1 após nevoeiro sem sal

Depois de submetidas a nevoeiro sem sal as telhas foram sujeitas a secagem na câmara de nevoeiro salino à temperatura de 35 °C durante 32 horas e foram pesadas ao longo desse período para avaliar o seu comportamento em secagem. Foi assim possível obter o gráfico da Figura 64 com a variação de massa das telhas.

A diferença entre a massa das telhas no fim da exposição a nevoeiro sem sal e a massa das telhas no início da secagem deveu-se à interrupção de produção de nevoeiro durante a noite. Assim, antes do início da secagem, as telhas permaneceram dentro da câmara sem nevoeiro durante um período de tempo indeterminado.

Após 12 horas de secagem o teor de água das telhas não hidrofugadas já tinha diminuído de mais de 7 % para cerca de 1,3 %. O teor de água da telha hidrofugada desceu de 1,5 % para 0,5 %. Após 23 horas o teor de água das telhas hidrofugadas era inferior a 0,5 % e o da telha hidrofugada cerca de 0,1 %.

No Quadro 44 são apresentadas a massa das telhas secas e o teor de água das telhas após 60 horas de nevoeiro sem sal e depois de 32 horas de secagem a 35 °C. Verifica-se que a secagem na câmara foi suficiente para que a massa das telhas voltasse a ser idêntica à massa inicial seca.

Quadro 44 - Massa seca das telhas e teor de água após nevoeiro sem sal e após secagem

Telha	Massa seca [g]	Variação de massa em relação à massa seca [%]	
		Após 60 h de nevoeiro sem sal, com pesagens intermédias	Após 32 h de secagem a 35 °C na câmara de nevoeiro salino, subsequente ao nevoeiro, com pesagens intermédias
F1 NH 1	4111	10,0	0,10
F1 B 1	3664	9,9	0,19
F1 H 1	4086	2,1	0,05

No Quadro 45 é apresentada a absorção de água das telhas após imersão durante 48 horas em água fria, de acordo com o procedimento de ensaio estabelecido no Anexo A da NP EN 539-2 [14]. A massa das telhas após a imersão é determinada após passagem com pano húmido para remover a água superficial.

Verifica-se que se as telhas não hidrofugadas estiverem sujeitas a nevoeiro dentro da câmara de nevoeiro salino durante tempo suficiente atingem um estado de saturação idêntico ao resultante da imersão em água fria à pressão atmosférica durante 48 horas, que é o estado considerado na normalização aplicável às telhas para o cálculo da sua absorção de água.

Quadro 45 - Absorção de água das telhas do fabricante 1

Telha	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
F1 NH 1	9,6
F1 B 1	9,4
F1 H 1	3,6

A telha branca foi a primeira a atingir a saturação na câmara de nevoeiro, após cerca de 30 horas, enquanto a telha vermelha só atingiu esse estado entre as 40 horas e as 48 horas de exposição a nevoeiro sem sal.

A telha hidrofugada apresentou uma subida de massa muito lenta ao longo das 60 horas de exposição ao nevoeiro, momento em que a sua massa aparentemente continuava a subir. Esta telha não atingiu, com a exposição a nevoeiro sem sal durante 60 horas, a massa determinada após as 48 horas de imersão.

A pequena diferença entre a variação de massa das telhas não hidrofugadas decorrente da exposição ao nevoeiro e a absorção de água obtida no ensaio de imersão pode ser explicada pela operação realizada antes da pesagem. Na absorção por imersão a superfície das telhas foi passada com pano húmido imediatamente após retirada da água e antes da pesagem, o que promoveu a remoção mais efectiva da água superficial. Na exposição ao nevoeiro as telhas foram retiradas da câmara e deixadas apenas escorrer, já que foi decidido interferir o menos possível no estado das telhas quando das pesagens realizadas ao longo do ensaio.

5.4.2.2 Nevoeiro com sal seguido de secagem

As telhas do fabricante 1 foram sujeitas a um ensaio idêntico ao anterior, mas agora com nevoeiro salino. Mais uma vez depois de secagem em estufa a 60 °C, as telhas foram colocadas dentro da câmara e sujeitas à acção de nevoeiro salino durante 48 horas, com a câmara programada para a temperatura de 35 °C. De seguida as telhas foram sujeitas, dentro da câmara, a 48 horas de secagem à mesma temperatura de 35 °C. Por fim foram transferidas para uma estufa não ventilada e colocada à temperatura de 60 °C durante o período de tempo necessário para que a sua massa estabilizasse.

O nevoeiro salino foi obtido por aspersão de uma solução salina com concentração de 110 g de cloreto de sódio para 1 litro de água desionizada.

Durante as 48 horas sob o nevoeiro salino as telhas foram pesadas várias vezes para obter o gráfico de evolução de massa da Figura 65. Antes de retirar as telhas para a pesagem foi preciso promover a extracção do nevoeiro salino para a atmosfera exterior para impedir a contaminação da atmosfera do laboratório quando da abertura da câmara. Isto foi conseguido interrompendo a aspersão e introduzindo ar na câmara para forçar a saída do nevoeiro pelo sistema de extracção.

Assim, a pesagem das telhas sujeitas a nevoeiro salino interrompeu o seu humedecimento contínuo durante mais tempo do que no ensaio de nevoeiro sem sal, e, para além disso, impôs às telhas um período de secagem de cerca de 15 minutos antes de serem pesadas. Para minimizar as consequências destas operações, as telhas foram pesadas poucas vezes durante o ensaio.

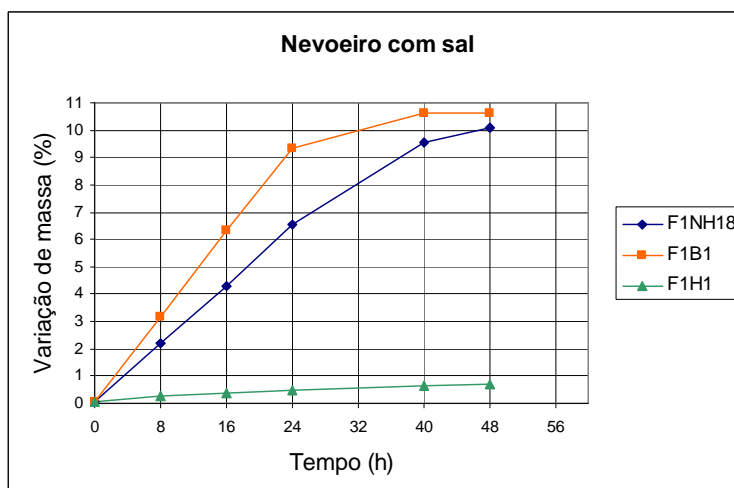


Figura 65 - Variação de massa de telhas do fabricante 1 sob nevoeiro com sal durante 48 h

Verifica-se que as telhas foram aumentando de massa ao longo do ensaio. A massa da telha branca estabilizou nas últimas 8 horas de ensaio enquanto a massa das restantes telhas ainda continuava a subir. No Quadro 46 apresenta-se a variação de massa das telhas decorrente da exposição ao nevoeiro salino durante 48 horas.

Quadro 46 - Variação de massa das telhas do fabricante 1 após 48 h de nevoeiro salino

Telha	Variação de massa em relação à massa seca após 48 h de nevoeiro salino, com pesagens intermédias [%]
F1 NH 18	10,1
F1 B 1	10,7
F1 H 1	0,7

Na Figura 66 apresentam-se as variações de massa das telhas no ensaio de nevoeiro sem sal e no ensaio de nevoeiro salino. Em termos gerais verifica-se que o comportamento dos três tipos de telhas é idêntico sob o efeito de nevoeiro sem sal e com sal. As diferenças poderão em parte ser justificadas pela diferença do procedimento necessário à determinação de massa das telhas ao longo dos ensaios.

Analisando mais em pormenor verifica-se que sob nevoeiro sem sal a massa da telha branca estabilizou em menos tempo do que sob nevoeiro salino. Sob nevoeiro sem sal esta telha sofreu um aumento de massa de 9,9 % enquanto sob nevoeiro salino atingiu 10,7 %, para o que terá contribuído a higroscopicidade do cloreto de sódio.

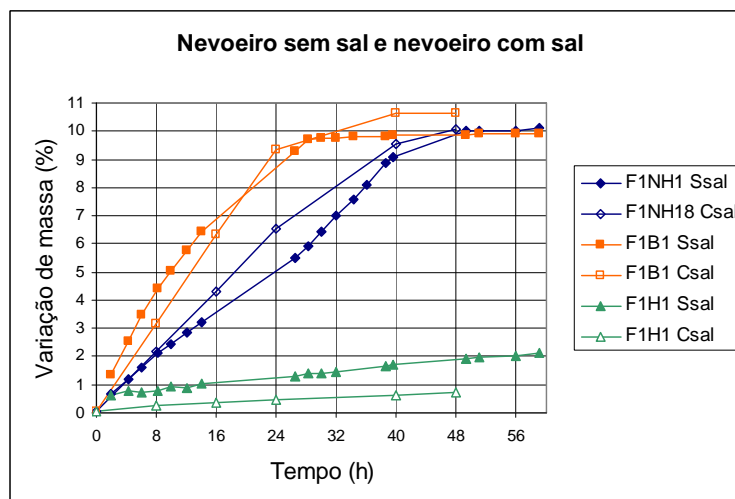


Figura 66 - Variação de massa sob nevoeiro sem sal e sob nevoeiro com sal

A telha vermelha sofreu o mesmo aumento de massa, de 10 %, no entanto no ensaio de nevoeiro salino a massa da telha ainda estava a aumentar e iria portanto estabilizar num valor superior. No ensaio de nevoeiro sem sal a massa da telha já tinha estabilizado ao fim de 48 horas.

A variação da massa da telha hidrofugada foi maior no ensaio de nevoeiro sem sal do que no ensaio de nevoeiro salino. Em ambos os ensaios a massa não chegou a estabilizar durante o decorrer dos ensaios e atingiu valores inferiores à absorção de água por imersão durante 48 horas.

A diferença das massas da telha hidrofugada ao longo dos dois ensaios de nevoeiro poderá ser explicada em grande parte pelas diferentes operações realizadas antes das pesagens. Durante o nevoeiro ia-se acumulando uma lâmina de água ou de solução salina à superfície da telha hidrofugada. No ensaio de nevoeiro sem sal essa lâmina era deixada escorrer, eventualmente não completamente, antes da pesagem. No ensaio de nevoeiro com sal decorriam cerca de 15 minutos entre a interrupção da entrada de nevoeiro na câmara e a abertura da tampa para retirar e pesar as telhas. Durante esses 15 minutos o ar quente

introduzido na câmara para forçar a saída do nevoeiro também promovia a secagem das telhas. Esta secagem tem maior importância relativa nas telhas hidrofugadas do que nas telhas não hidrofugadas devido à grande diferença de aumento de massa entre os dois tipos de telhas.

Após terminar o nevoeiro salino, as telhas foram pesadas e colocadas de novo na câmara, onde foram sujeitas a secagem a 35 °C durante 48 horas. Dado não haver nevoeiro salino dentro da câmara durante a secagem, foi possível pesar as telhas várias vezes e obter o gráfico de variação de massa da Figura 67.

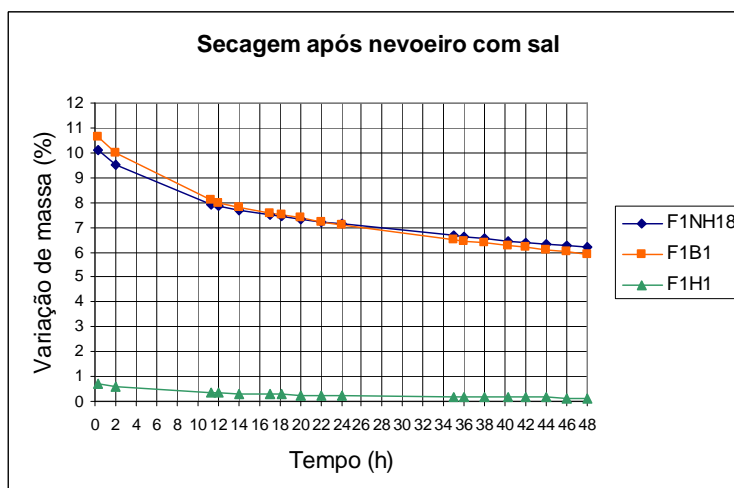


Figura 67 - Secagem a 35 °C durante 48 h de telhas do fabricante 1 após nevoeiro com sal

Após 48 horas de secagem a massa das telhas não hidrofugadas, face à sua massa seca antes dos ensaios, passou de 10,1 % para 6,2 % (F1 NH 18) e de 10,7 % para 5,9 % (F1 B 1). O tempo de secagem na câmara não foi suficiente para a estabilização da massa destas telhas não hidrofugadas.

Comparando com os resultados obtidos na secagem também a 35 °C das telhas não hidrofugadas após nevoeiro sem sal (Figura 68), verifica-se que a secagem das telhas com sal é muito mais lenta do que a secagem das telhas sem sal.

A relação da massa da telha hidrofugada com a massa inicial seca passou de 0,7 % para 0,15 % após 48 horas de secagem, enquanto na secagem durante 32 horas após nevoeiro

sem sal tinha passado de 1,5 % para 0,05 %. Também neste caso a secagem após nevoeiro sem sal é mais rápida do que a secagem após nevoeiro salino.

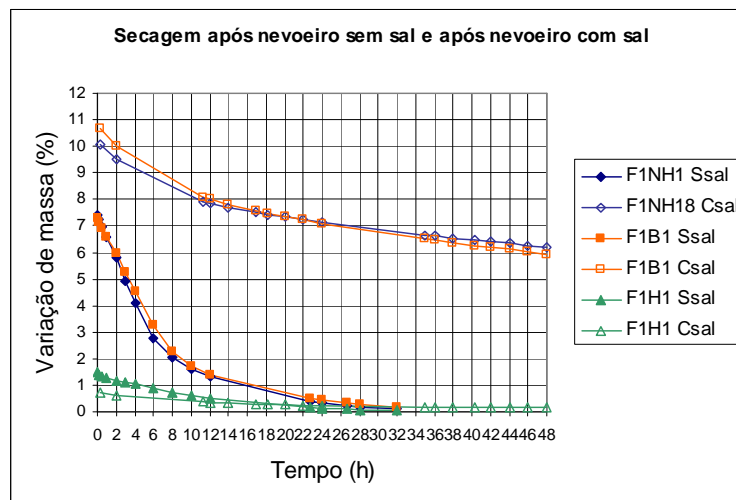


Figura 68 - Comparação da secagem a 35 °C após nevoeiro sem sal e nevoeiro com sal

Para continuar a secagem, as telhas com sal foram colocadas numa estufa não ventilada e à temperatura de 60 °C durante o tempo necessário à estabilização da sua massa. A pesagem das telhas ao longo do tempo permitiu obter o gráfico da Figura 69 e verificar que só ao fim de 180 horas é que as telhas não hidrofugadas atingiram o estado de secas em estufa à temperatura de 60 °C, comparável com a massa seca determinada antes dos ensaios de nevoeiro.

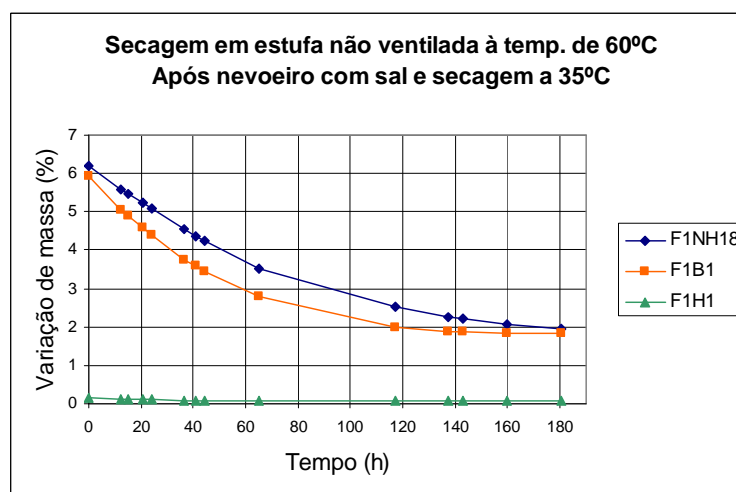


Figura 69 - Secagem em estufa não ventilada a 60 °C após nevoeiro com sal e secagem

A secagem fez com que a relação da massa das telhas não hidrofugadas com a respectiva massa inicial seca passasse de cerca de 6 % para cerca de 2 %. A relação da massa da telha hidrofugada com a massa inicial seca passou de 0,15 % para 0,06 %.

O aumento de massa das telhas não hidrofugadas decorrente do ensaio de nevoeiro salino, expresso em cerca de 2 % face à massa inicial das telhas secas, deve-se à acumulação de sal nas telhas. Sob o efeito do nevoeiro salino as telhas foram absorvendo a solução salina, atingindo um aumento de peso de 10 % a 11 %. As secagens subsequentes promoveram a perda da água absorvida e a cristalização do cloreto de sódio.

5.4.3 Ensaios preliminares cíclicos de nevoeiro salino seguido de secagem

5.4.3.1 Introdução

Foram realizados ensaios preliminares para avaliar o comportamento de telhas cerâmicas sob o efeito de ciclos constituídos por um período de nevoeiro salino seguido de um período de secagem.

No primeiro ensaio preliminar os provetes foram submetidos a 10 ciclos de 24 horas, sendo cada ciclo constituído por 8 horas de nevoeiro salino seguido por 16 horas de secagem. O segundo ensaio preliminar foi constituído por 10 ciclos de 48 horas, cada um compreendendo 10 horas de nevoeiro salino seguido por 38 horas de secagem.

Os ensaios preliminares foram realizados na mesma câmara de nevoeiro salino já utilizada nos ensaios anteriores. Durante todo o período de tempo em que decorreu cada um dos ensaios a câmara esteve programada para a temperatura de 35 °C. O nevoeiro salino foi obtido por aspersão de uma solução salina com concentração de 110 g de cloreto de sódio para 1 litro de água desionizada.

O primeiro ensaio preliminar incidiu sobre três telhas antigas e o segundo ensaio preliminar incidiu sobre duas das mesmas três telhas antigas e sobre uma telha nova, sendo esta a telha vermelha não hidrofugada do fabricante 1 (F1 NH 1), que também foi sujeita ao ensaio contínuo de nevoeiro sem sal seguido de secagem descrito antes.

As três telhas antigas deram origem a cinco provetes: duas telhas inteiras designadas T1 e T2 e três fragmentos da terceira telha, um maior designado T3 e dois mais pequenos designados T3 B e T3 C, ilustrados na Figura 70.



Figura 70 - Provetes T3 B, T3 e T3 C

A Figura 71 apresenta os provetes na câmara antes do início de cada um dos ensaios preliminares.



Figura 71 - Disposição dos provetes no ensaio preliminar 1 e no ensaio preliminar 2

À semelhança das telhas novas utilizadas nos restantes ensaios do estudo, as telhas antigas são telhas lusas ou de aba e canudo e tinham dimensões aproximadas de 44,5 cm x 26 cm (comprimento x largura). Encontravam-se no armazém do LNEC há mais de cinco anos, apresentavam marcações correspondentes ao modelo e ao fabricante e desconhece-se se foram anteriormente sujeitas a algum tipo de ensaio.

Foi determinada a absorção de água dos provetes por imersão em água fria durante 48 horas, de acordo com o procedimento descrito no Anexo B da Norma portuguesa NP EN 539-2 [14], tendo sido obtidos os resultados apresentados no Quadro 47.

Quadro 47 - Absorção de água dos provetes usados nos ensaios preliminares

Provetes	Absorção de água fria por imersão W_u [%]
T1	11,6
T2	12,2
T3	11,1
T3 B	11,1
T3 C	11,7
F1 NH 1	9,6

Durante os ensaios preliminares, para se ter uma ideia qualitativa do processo de humedecimento pelo nevoeiro e de secagem por ar quente, os provetes foram pesados duas vezes em cada ciclo, a primeira após a fase de nevoeiro salino e a segunda no final da secagem, antes do início do nevoeiro do ciclo seguinte.

A pesagem após a fase de nevoeiro foi realizada cerca de 15 minutos depois do fim do nevoeiro, tendo portanto já decorrido 15 minutos de secagem, de modo a evitar que o nevoeiro salino saísse da câmara para o laboratório quando da abertura da tampa.

A pesagem no final da secagem foi realizada cerca de 10 minutos antes do fim da secagem, para permitir que as operações de pesagem, ou outras, fossem realizadas antes do início do nevoeiro, momento em que a câmara deveria estar novamente fechada, para impedir a saída de nevoeiro salino.

Foi decidido interferir o menos possível no processo de degradação durante as operações necessárias à obtenção da massa dos provetes. Após a fase de nevoeiro, ao retirar os provetes da câmara, e antes de os pesar, deixou-se escorrer a solução que se encontrava em excesso na sua superfície e não se limpou esta com um pano húmido. Após a fase de secagem não se passou com um pincel na superfície dos provetes e assim não se promoveu artificialmente a separação de material resultante da degradação e consequente exposição de zonas ainda não degradadas dos provetes.

Com o decorrer dos ensaios verificou-se que a manipulação dos provetes mais degradados e o seu transporte até à balança e de volta para a câmara provocava a queda de material solto resultante da degradação, foi então decidido deixar cair o material que estava efectivamente solto à superfície dos provetes antes de os pesar.

As massas dos provetes obtidas ao longo do ensaio correspondem ao balanço final no momento de cada pesagem das seguintes parcelas: massa inicial dos provetes, massa do material perdido devido à degradação, massa de solução salina absorvida durante as fases de nevoeiro salino, massa da água perdida por evaporação durante as secagens, massa dos cristais de sal que se formam nos provetes durante as secagens e que se foram acumulando ao longo dos ciclos.

5.4.3.2 Ensaio preliminar 1

Na Figura 72 e na Figura 73 apresentam-se os gráficos com a variação de massa, em percentagem da massa seca inicial, no fim de cada um dos períodos de 8 horas de nevoeiro salino e de 16 horas de secagem dos 10 ciclos de 24 horas do ensaio preliminar 1. Também está representada a absorção de água por imersão em água fria de cada provete, apresentada no Quadro 47. Os valores referentes ao provete T3 são representados nos dois gráficos para facilitar a comparação com os restantes provetes.

Durante os ciclos de nevoeiro e secagem verifica-se, em termos gerais, uma tendência para o aumento da massa dos provetes. Isto acontece nas massas após nevoeiro e também nas massas após secagem.

Apesar da duração do período de nevoeiro ser metade da duração da secagem, esta não é suficiente para que a massa dos provetes no fim dos ciclos volte a ser a que tinham no início de cada ciclo. Isto é devido ao sal que se vai acumulando nos provetes e à maior dificuldade de secar provetes sujeitos a nevoeiro salino, como se observou ao comparar os resultados das secagens subsequentes aos ensaios de nevoeiro contínuo sem sal e com sal.

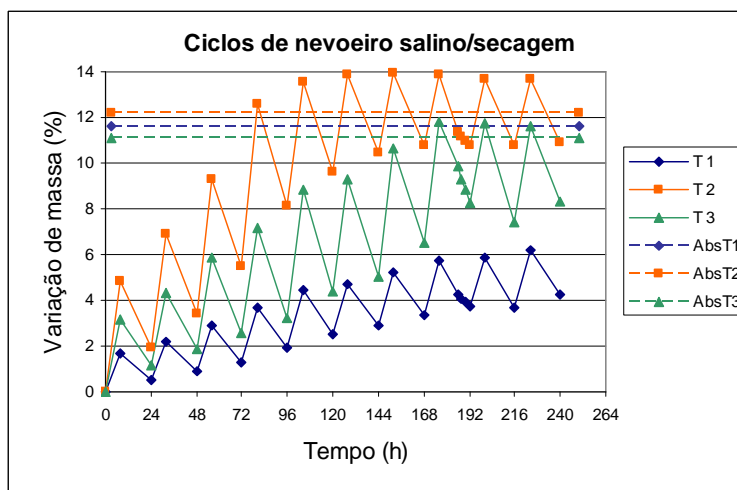


Figura 72 - Variação de massa dos provetes T1, T2 e T3 nos ciclos de 24 horas

A telha T2, a que tem maior absorção de água, é a primeira a atingir, no quarto ciclo, uma variação de massa no fim do nevoeiro correspondente ao valor da absorção de água. Nos ciclos seguintes a sua massa no fim do nevoeiro continua a aumentar até atingir cerca de 14 %, tendo este valor estabilizado nos restantes ciclos.

O aumento de massa da telha T3 ao longo dos ciclos é mais lento do que o da telha T2. A variação de massa de T3 também atinge e ultrapassa o valor da absorção de água por imersão, mas só no final da fase de nevoeiro do oitavo ciclo.

A massa da telha T1 também vai aumentando com o decorrer dos ciclos, no entanto a uma taxa inferior à das outras duas telhas, e não chega a atingir uma variação de massa do valor da sua absorção de água. A observação desta telha ao longo do ensaio permitiu concluir que a zona útil da sua face superior estava protegida por um produto hidrófugo, o que terá atenuado a absorção de solução salina durante a fase de exposição ao nevoeiro salino.

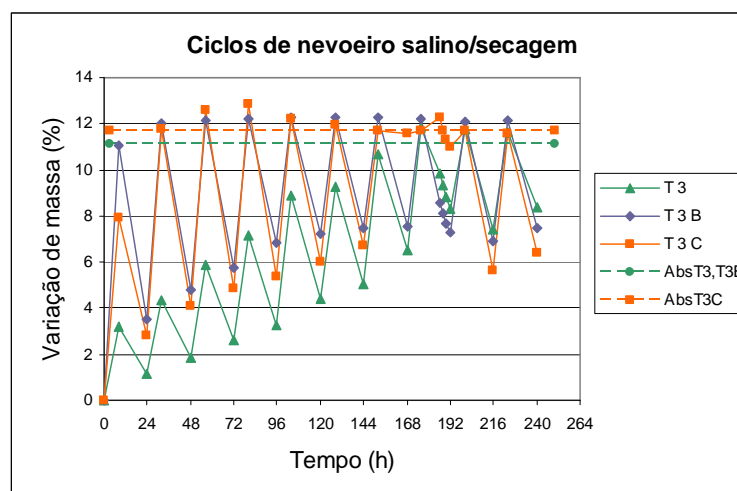


Figura 73 - Variação de massa dos provetes T3, T3 B e T3 C nos ciclos de 24 horas

Analisando a Figura 73 observa-se que a evolução ao longo dos ciclos da variação de massa da telha T3 e dos fragmentos T3 B e T3 C é diferente. Os dois fragmentos atingem logo no segundo ciclo valores de variação de massa superiores à respectiva absorção de água fria, o que só acontece com a telha T3 no oitavo ciclo. A partir do oitavo ciclo o comportamento da telha T3 e do fragmento T3 B é idêntico. No sétimo e no oitavo ciclo não foi possível secar o fragmento T3 C por razões operacionais, o que provocou a alteração do estado do provete e deu origem às diferenças observáveis no gráfico.

A diferença entre os valores da variação de massa após o nevoeiro e após a secagem dos provetes é menor na telha do que nos fragmentos, o que pode indicar que nestes foram mais eficazes o humedecimento pelo nevoeiro e a secagem.

Todos os provetes se degradaram sob o efeito dos ciclos de nevoeiro salino/secagem, tendo perdido material na forma de grânulos, escamas e plaquetas. No Quadro 48 apresenta-se um resumo da degradação observada nos provetes, com a indicação do tipo de degradação, do seu início e do nível de degradação atingido, em termos de severidade, da área abrangida e das faces mais afectadas.

O provete T1, que aparentemente tinha a zona útil da face superior tratada com um material hidrófugo, perdeu material da zona das juntas da face superior e em toda a face inferior. Também ocorreu degradação sob a camada hidrofugada, o que levou ao

destacamento de plaquetas de material cerâmico e desagregação granular sob essa camada hidrofugada.

Quadro 48 - Degradação sofrida pelos provetes durante o ensaio preliminar 1

Provetes	Tipos de degradação	Início da degradação	Âmbito da degradação	Nível da degradação	Faces mais afectadas
T1	Desagregação granular Escamação Empolamento Plaquetas Fissuras	Ciclo 3	Localizada nas juntas da face superior. Generalizada na face inferior	Médio	Superior e inferior
T2	Desagregação granular	Ciclo 3	Localizada na face superior. Generalizada na face inferior	Baixo	Inferior
T3	Desagregação granular Escamação Plaquetas	Ciclo 2	Generalizada	Elevado	Superior
T3 B	Desagregação granular Escamação	Ciclo 2	Localizada	Médio	Superior
T3 C	Desagregação granular Escamação	Ciclo 2	Generalizada	Elevado	Superior e inferior

O provete T2 não sofreu degradação na face superior, tendo perdido material apenas da face inferior.

Os provetes T3 e T3 C começaram a degradar-se logo ao fim dos primeiros ciclos, tendo perdido material sob a forma de grânulos e escamas. A degradação continuou ao longo dos ciclos, tendo ocorrido a perda de várias camadas sucessivas de material. A primeira camada de T3 C degradou-se sob a forma de escamas e a degradação prosseguiu sob a forma de grânulos. No provete T3 destacaram-se várias camadas na forma de escamas e algumas plaquetas, material com grande extensão e pequena espessura.

O provete T3 apresentou perda de massa generalizada nas zonas da aba e canudo da superfície superior e em menor quantidade na zona da junta lateral. A perda de material da face inferior foi em menor quantidade.

Quanto aos fragmentos, o provete T3 C perdeu material em todas as superfícies. A degradação no provete T3 B ocorreu principalmente em duas zonas localizada da face superior, de que resultou a perda de material na forma de grânulos e escamas. Na face inferior essa perda foi em menor quantidade e sob a forma de grânulos.

A diferença entre os gráficos das telhas T2 e T3 que se observa na Figura 72, para além de ser devida à maior absorção de água da telha T2, também se deve à maior perda de material da telha T3 ao longo do ensaio. A degradação da telha T3 foi superior e começou antes da degradação da telha T2.

Nas figuras seguintes apresentam-se aspectos mais importantes da evolução da degradação dos provetes ao longo dos ciclos.



Após ciclo 3



Após ciclo 7



Após ciclo 8



Após ciclo 10

Figura 74 - Evolução da degradação do provete T1 no ensaio preliminar 1



Após ciclo 2



Após ciclo 10

Figura 75 - Provete T2 no ensaio preliminar 1



Após ciclo 2



Após ciclo 3



Após ciclo 7



Após ciclo 10

Figura 76 - Evolução da degradação do provete T3 no ensaio preliminar 1



Figura 77 - Degradação na aba do provete T3 após ensaio preliminar 1



Após ciclo 2

Após ciclo 3



Após ciclo 6

Após ciclo 7

Figura 78 - Evolução da degradação do provete T3 B no ensaio preliminar 1



Após ciclo 8



Após ciclo 10

Figura 79 - Evolução da degradação do provete T3 B no ensaio preliminar 1 (cont.)



Após ciclo 2



Após ciclo 3



Após ciclo 6



Após ciclo 10

Figura 80 - Evolução da degradação do provete T3 C no ensaio preliminar 1

O ensaio cíclico provocou degradação visível em todos os provetes e conseguiram-se distinguir provetes com comportamentos diferentes, será assim adequado para estudar o comportamento de telhas cerâmicas sob os efeitos de nevoeiro salino.

O tipo de degradação dos fragmentos T3 B e T3 C é semelhante à da telha T3, o que permite admitir que os ensaios realizados sobre fragmentos de telhas são representativos do comportamento de telhas inteiras.

Depois do ensaio preliminar os provetes foram secos em estufa, de seguida foram limpos com pincel e espátula para retirar o material degradado. Depois foram dessalinizados através da imersão em água desmineralizada renovada periodicamente. Por fim foram de novo secos em estufa e pincelados para retirar o material solto, ficando assim preparados para o ensaio preliminar seguinte.

5.4.3.3 Ensaio preliminar 2

No segundo ensaio preliminar foi aumentada a duração de exposição ao nevoeiro salino de 8 horas para 10 horas e aumentada ainda mais a duração da fase de secagem, de 16 horas para 38 horas. Assim, a duração de cada ciclo passou de 24 horas para 48 horas. Pretendeu-se averiguar se estas diferenças promoviam uma degradação mais rápida dos provetes.

Para efeitos comparativos foram utilizados os mesmos provetes obtidos de duas das três telhas antigas, designadamente os provetes T2, T3, T3 B e T3 C. Para além destes foi decidido substituir a telha antiga T1 por uma telha nova do fabricante 1 (F1 NH 1), que também foi submetida ao ensaio de nevoeiro sem sal descrito em 5.4.2.1.

A utilização da telha T1 no primeiro ensaio preliminar permitiu observar o tipo de comportamento espectável, sob o efeito de nevoeiro salino, de telhas parcialmente hidrofugadas. A utilização da telha F1 NH 1 neste ensaio preliminar 2 permitirá avaliar o comportamento de um dos tipos de telhas novas que irão ser utilizados nos restantes ensaios de exposição a nevoeiro salino.

Na Figura 81 e na Figura 82 apresentam-se os gráficos com a variação de massa, em percentagem da massa seca inicial, no fim de cada um dos períodos de 10 horas de nevoeiro salino e de 38 horas de secagem dos 10 ciclos de 48 horas do ensaio preliminar 2. Também está representada a absorção de água por imersão em água fria de cada provete, apresentada no Quadro 47. Os valores referentes ao provete T3 são representados nos dois gráficos para facilitar a comparação com os restantes provetes.

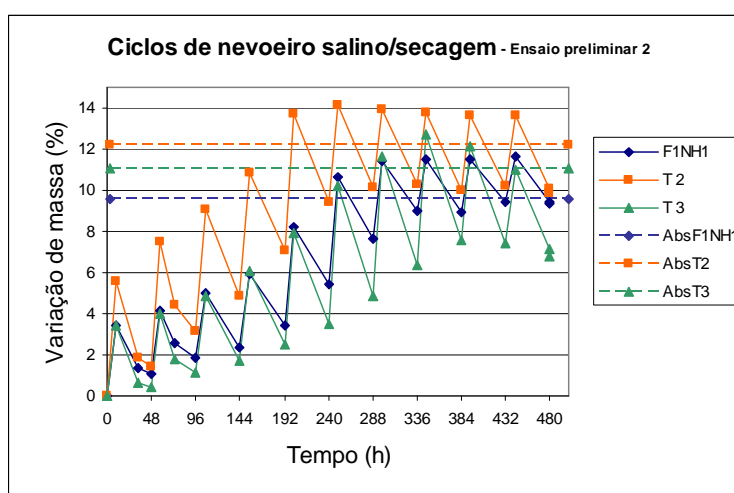


Figura 81 - Variação de massa dos provetes F1NH1, T2 e T3 nos ciclos de 48 horas

Tal como no ensaio preliminar 1, observa-se uma tendência geral para o aumento da massa dos provetes ao longo do ensaio, tanto a sua massa após nevoeiro como a massa após secagem. O aumento da duração do período de secagem para mais do dobro em relação ao ensaio preliminar 1 não foi ainda suficiente para alterar desta tendência.

Também neste ensaio é a telha T2 a primeira a atingir uma variação de massa no fim do nevoeiro correspondente ao valor da absorção de água. No ensaio preliminar 1 isso aconteceu no quarto ciclo, no ensaio preliminar 2 aconteceu no quinto ciclo.

O aumento de massa da telha T3 também é mais lento do que o aumento da telha T2. A telha T3 atinge no sétimo ciclo deste ensaio o valor correspondente à absorção de água, enquanto no ensaio preliminar 1 tinha atingido esse valor no oitavo ciclo.

A massa do provete novo do fabricante 1 também vai aumentando ao longo do ensaio, e atingiu o valor correspondente à sua absorção de água após a fase de nevoeiro do sexto ciclo. A diminuição da massa do provete F1 NH 1 provocada pela fase de secagem é inferior à dos outros provetes.

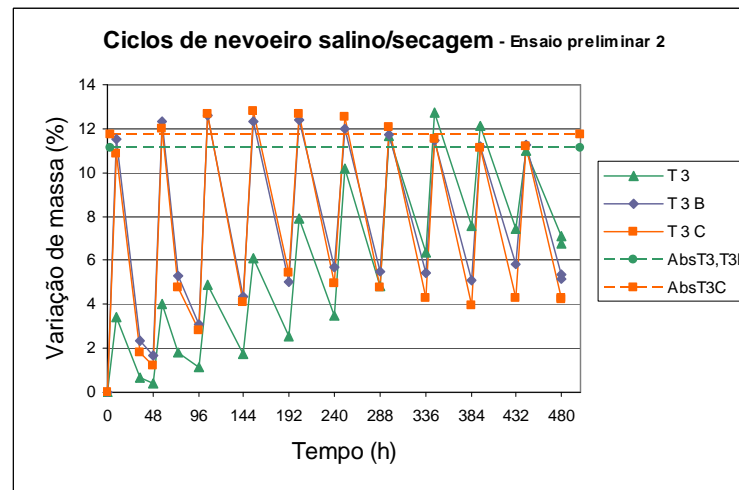


Figura 82 - Variação de massa dos provetes T3, T3 B e T3 C nos ciclos de 48 horas

Tal como nos ciclos de 24 horas, nestes ciclos de 48 horas o comportamento dos fragmentos T3 B e T3 C, em termos de variação de massa no fim do nevoeiro e da secagem, é diferente do comportamento da telha T3. Os dois fragmentos atingem logo no primeiro e no segundo ciclo valores de variação de massa superiores à respectiva absorção de água fria, o que só acontece com a telha T3 no sétimo ciclo.

Neste ensaio preliminar 2 também se verifica que a diferença entre os valores da variação de massa após o nevoeiro e após a secagem dos provetes é menor na telha do que nos fragmentos, o que pode indicar que nestes foram mais eficazes o humedecimento pelo nevoeiro e a secagem.

Todos os provetes que também foram sujeitos ao primeiro ensaio preliminar se degradaram neste segundo ensaio preliminar, tendo perdido material na forma de grânulos, escamas, lascas e plaquetas. A degradação na forma de lascas, fragmentos com pequena extensão lateral e grande espessura, não tinha ocorrido no primeiro ensaio.

No Quadro 49 apresenta-se um resumo da degradação observada nos provetes, com a indicação do tipo de degradação, do seu início e do nível de degradação atingido, em termos de severidade, da área abrangida e das faces mais afectadas.

Quadro 49 - Degradação sofrida pelos provetes durante o ensaio preliminar 2

Provetes	Tipos de degradação	Início da degradação	Âmbito da degradação	Nível da degradação	Faces mais afectadas
F1 NH1	Desagregação granular	Ciclo 4	Generalizada	Muito baixo	Superior e inferior
T2	Picamento Desagregação granular Lasca	Ciclo 2	Localizada na face superior. Localizada na face inferior	Médio	Inferior
T3	Desagregação granular Escamação Plaquetas	Ciclo 3	Generalizada	Elevado	Superior
T3 B	Desagregação granular Escamação	Ciclo 2	Localizada	Médio	Superior
T3 C	Desagregação granular Escamação	Ciclo 2	Generalizada	Médio	Superior e inferior

A telha F1 NH 1 apresentou no final do ensaio um pó fino fixado às superfícies superior e inferior, o nível de degradação sofrido foi muito baixo.

A degradação dos provetes que também foram sujeitos ao ensaio preliminar 1 foi, em termos gerais, uma continuação da degradação que se tinha iniciado nesse primeiro ensaio.

A telha T2 atingiu um nível de degradação média, mais elevado do que no primeiro ensaio, devido ao aparecimento de lascas, fragmentos com pequena extensão lateral e grande espessura, que se destacaram das arestas da face inferior.

A degradação do provete T3 foi do mesmo tipo e intensidade da sofrida no primeiro ensaio, sendo este o provete que mais se degradou.

O comportamento do provete T3 B foi idêntico no primeiro e no segundo ensaio preliminar.

O provete T3 C perdeu toda a camada superficial no primeiro ensaio, e portanto neste segundo ensaio a superfície exposta já não era a superfície original. O nível de degradação neste ensaio foi médio, inferior ao nível elevado do primeiro ensaio, porque a quantidade de material que se destacou na forma de escamas foi inferior.

A telha F1 NH 1 tem menor absorção de água do que os outros provetes e foi a que se degradou menos enquanto a Telha T3 se degradou mais tendo perdido mais material do que os outros provetes ensaiados.

No gráfico da Figura 81 observa-se que o aumento de massa no fim do nevoeiro salino das telhas F1 NH 1 e T3 é idêntico e que a diminuição de massa provocada pela secagem é maior na telha T3 do que na telha F1 NH 1. Isto pode ser explicado em parte pela maior degradação e maior perda de material do provete T3 ao longo dos ciclos.

5.4.3.4 Conclusões relativas aos ensaios preliminares

Considerando as massas dos provetes após nevoeiro e após secagem e tendo em conta o número de ciclos em vez do tempo decorrido, é possível sobrepor os gráficos que representam a variação de massa dos provetes ao longo de cada um dos dois ensaios preliminares. É assim possível comparar, em termos de variação de massa, o comportamento dos provetes sob a acção dos dois tipos de ensaios.

Da Figura 83 até à Figura 86 apresentam-se os gráficos dos provetes T2, T3, T3 B e T3 C, que foram os provetes sujeitos aos dois ensaios preliminares.

Em termos gerais verifica-se que as telhas T2 e T3 apresentam o mesmo tipo de comportamento sob o efeito dos dois tipos diferentes de ciclos.

No ensaio preliminar 1 a telha T2 atingiu no fim do período de nevoeiro do quarto ciclo uma variação de massa correspondente ao valor da absorção de água, no ensaio preliminar 2 o mesmo ocorreu apenas no quinto ciclo.

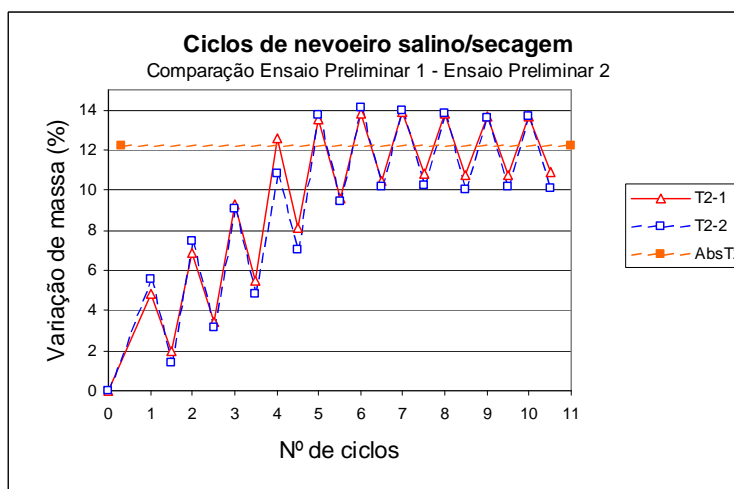


Figura 83 - Provete T2

No caso da telha T2 verifica-se no ensaio preliminar 2 um maior aumento de peso decorrente do período de nevoeiro e também uma maior diminuição de peso devida à secagem em quase todos os ciclos. No entanto essa diferença não parece ser suficiente para justificar a selecção dos ciclos de 48 horas em alternativa aos de 24 horas, com metade da duração.

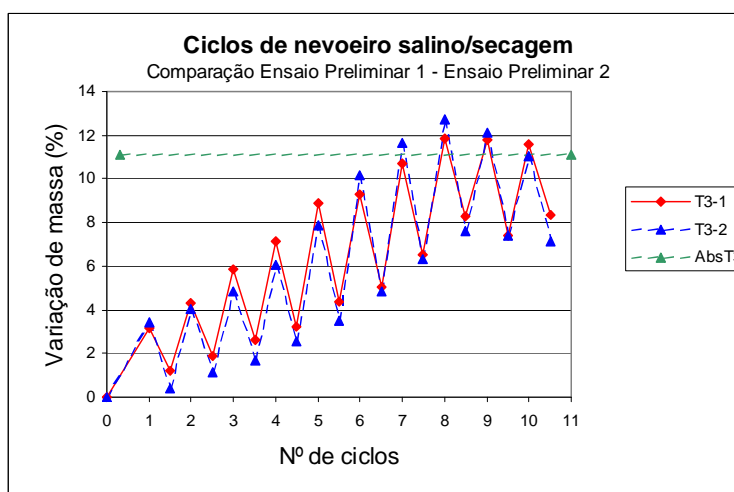


Figura 84 - Provete T3

A telha T3 atingiu o valor correspondente à absorção de água no fim do período de nevoeiro do oitavo ciclo do ensaio preliminar 1 e do sétimo ciclo do ensaio preliminar 2.

No caso da telha T3 só nalguns ciclos do ensaio preliminar 2 o aumento de peso no período de nevoeiro e a sua diminuição durante a secagem foram maiores do que no ensaio preliminar 1. Estes resultados são também influenciados pela perda de massa decorrente da degradação, que foi maior na telha T3 do que na telha T2.

De qualquer modo mesmo nos ciclos em que a variação de massas foi superior no ensaio preliminar 2, mais uma vez tal diferença não parece suficiente para seleccionar ciclos com o dobro da duração.

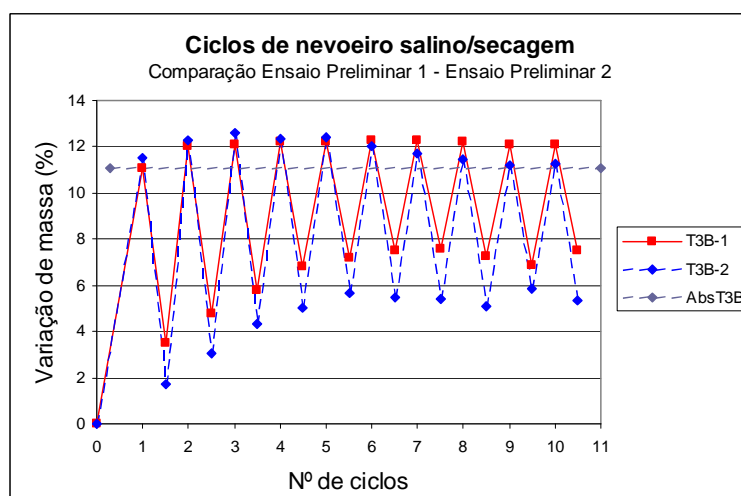


Figura 85 - Provete T3 B

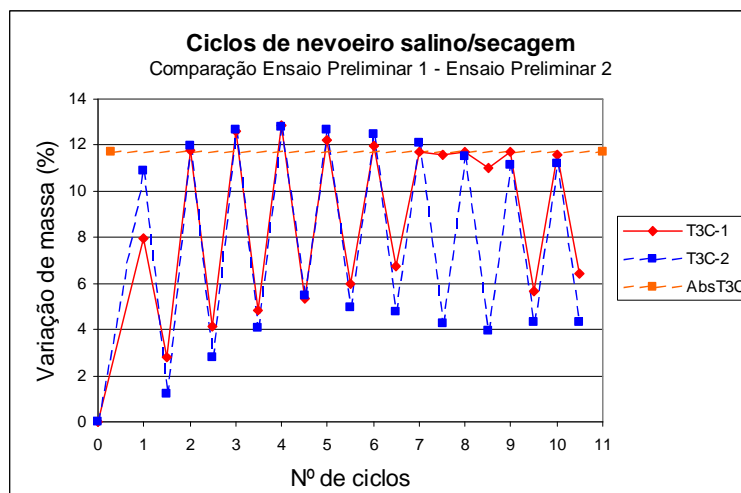


Figura 86 - Provete T3 C

Genericamente o comportamento dos fragmentos T3 B e T3 C foi similar em termos de variação de massa sob os efeitos dos dois tipos de ciclos.

Nos dois fragmentos há maior variação de massas durante o nevoeiro e a secagem no ensaio preliminar 2 do que no ensaio preliminar 1. Esta maior eficácia do ciclo de 48 horas é mais evidente no provete T3 B, sendo em T3 C comparável à das telhas T2 e T3.

A maior eficácia do ensaio preliminar 2 sobre a variação de massa do provete T3 B não teve correspondência em maior degradação observada neste provete. Como foi referido, o comportamento deste provete foi equivalente em termos da degradação observada em cada um dos ensaios preliminares.

O ensaio preliminar 1, com ciclos de 24 horas, provocou degradação visível em todos os provetes e permitiu distinguir comportamentos diferentes em telhas diferentes. Este tipo de ensaio parece assim adequado para avaliar a durabilidade de telhas cerâmicas quando expostas a ambiente marítimo.

Os tipos de degradação observada nos dois fragmentos mostraram paralelismo com a degradação observada na telha partida de onde provieram, o que permite afirmar que o comportamento dos fragmentos de telhas sujeitos a este tipo de ensaio é representativo do comportamento de telhas inteiras.

Na tentativa de obter maiores níveis de degradação, com o mesmo ou menor número de ciclos, e averiguar se se acentuavam as distinções entre telhas com diferentes comportamentos, foi realizado o ensaio preliminar 2 com ciclos de 48 horas (10 horas de nevoeiro salino + 38 horas de secagem).

Nos provetes sujeitos aos dois ensaios preliminares, a degradação no ensaio preliminar 2 foi, em termos gerais, uma continuação da degradação ocorrida no ensaio preliminar 1. Nos casos em que no segundo ensaio ocorreram tipos de degradação que não se observaram no primeiro ensaio, tal terá sido devido mais às diferenças entre o estado dos provetes no início de cada um dos ensaios e menos às diferenças de duração dos ciclos. No início do primeiro ensaio preliminar os provetes estavam em estado novo e no decorrer deste ensaio sofreram degradação e perderam parte da camada superficial. Após

dessalinização e secagem estes provetes apresentavam exposta, no início do ensaio preliminar 2, uma superfície já degradada.

As diferenças de comportamento sob os dois tipos de ciclos em termos de variação de massa dos provetes ao longo dos ciclos, dos tipos e níveis de degradação observados e do ritmo de evolução da degradação, não foram suficientes para justificar a selecção dos ciclos mais prolongados de 48 horas em alternativa aos ciclos de 24 horas.

Portanto, os resultados dos dois ensaios preliminares, um com ciclos de 48 horas (10 horas de nevoeiro salino + 38 horas de secagem) e outro com ciclos de 24 horas (8 horas + 16 horas), permitiram a selecção de ciclos de 24 horas para os ensaios cíclicos de envelhecimento acelerado descritos a seguir.

5.4.4 Ensaio cíclico de envelhecimento acelerado

5.4.4.1 Introdução

Os ensaios cíclicos de envelhecimento acelerado foram baseados no procedimento de ensaio da norma europeia EN 14147, com algumas adaptações. Os ensaios foram realizados numa câmara de nevoeiro salino onde os provetes foram submetidos a ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem (Figura 61), seleccionados a partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares. Durante os ciclos a temperatura da câmara esteve programada para 35 °C. O nevoeiro salino foi obtido por aspersão de uma solução salina com concentração de 110 g de cloreto de sódio para 1 litro de água desionizada.

Para cada tipo de telha foram submetidos um ou dois provetes a 10 ciclos, um ou dois provetes a 20 ciclos e três ou quatro provetes a 30 ciclos, como é discriminado no Quadro 50.

Em consequência todos os provetes de cada tipo foram sujeitos a 10 ciclos e todos os provetes sujeitos a 30 ciclos também foram sujeitos a 20 ciclos.

Quadro 50 - Tipo e número de provetes sujeitos a ciclos de nevoeiro salino/secagem

Fabricante	Tipo de provetes	Nº de provetes sujeitos a 10 ciclos	Nº de provetes sujeitos a 20 ciclos	Nº de provetes sujeitos a 30 ciclos	Nº de provetes de cada tipo
1	F1 NH	1	1	3	5
	F1 B	1	1	3	5
	F1 H	1	1	3	5
2	F2 NH	1	1	3	5
	F2 B	2	2	4	8
	F2 H	1	1	3	5
	F2 T2 NH	1	1	3	5
	F2 T3 NH	2	2	4	8
Nº de provetes ensaiados		10	10	26	48

Sendo a capacidade máxima da câmara de 12 provetes, os ensaios decorreram por três vezes. Da primeira vez foram ensaiados provetes dos 3 tipos do fabricante 1, da segunda vez foram ensaiados 3 tipos de provetes do fabricante 2 (F2 NH, F2 H e F2 T2 NH) e da terceira e última vez foram ensaiados provetes dos restantes 2 tipos do fabricante 2 (F2 B e F2 T3 NH).

Em cada ensaio a câmara funcionou durante 30 ciclos de 24 horas (8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem). No início do ensaio dos provetes do fabricante 1 e do primeiro grupo de provetes do fabricante 2 foram colocados na câmara 4 provetes de cada tipo. No fim de 10 ciclos foram retirados 1 provete de cada tipo (provetes sujeitos a apenas 10 ciclos) e substituídos por outro provete dos mesmos tipos (provetes colocados na câmara entre o ciclo 11 e o ciclo 30 e portanto sujeitos a um total de 20 ciclos). Os 3 provetes de cada tipo que permaneceram na câmara durante a duração do ensaio foram portanto sujeitos a um total de 30 ciclos.

O último grupo de provetes ensaiados foi constituído por 2 tipos diferentes de provetes do fabricante 2. No início do ensaio foram colocados na câmara 6 provetes de cada tipo. No fim do 10º ciclo foram retirados 2 provetes de cada tipo (provetes sujeitos a apenas 10 ciclos) e substituídos por outros 2 provetes de cada tipo (provetes sujeitos a um total de 20 ciclos). Os 4 provetes de cada tipo que permaneceram na câmara durante a duração do ensaio foram portanto sujeitos a um total de 30 ciclos.



Figura 87 - Montagem dos provetes na câmara de nevoeiro salino

5.4.4.2 Ensaio cíclico de provetes do Fabricante 1

O primeiro ensaio foi iniciado com os provetes do fabricante 1 identificados na Figura 88, estando indicados a negrito os provetes que permaneceram na câmara apenas durante os primeiros 10 ciclos.

F1 B 17 C

F1 H 7 C

F1 NH 9 C

F1 B 7 C

F1 H 5 C

F1 NH 5 C



F1 H 8 C

F1 NH 10 C

F1 B 9 C

F1 H 6 C

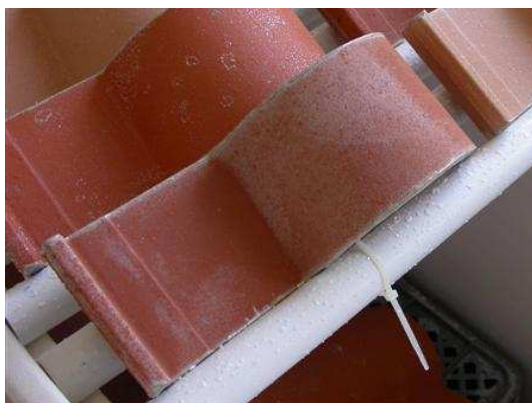
F1 NH 6 C

F1 B 6 C

Figura 88 - Provetes do fabricante 1 no início do ensaio

Nas figuras das páginas seguintes apresenta-se o estado de todos os provetes ao fim de 10 ciclos de ensaio, incluindo também os provetes F1 NH 14 C, F1 B 13 C e F1 H 3 C, que estiveram na câmara entre os ciclos 11 e 30.

Na Figura 89 apresentam-se os cinco provetes vermelhos não hidrofugados do fabricante 1 (F1 NH) após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.



F1 NH 5 C



F1 NH 9 C



F1 NH 10 C



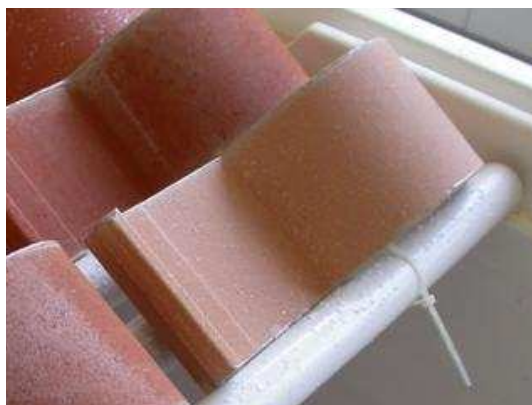
F1 NH 14 C



F1 NH 6 C

Figura 89 - Provetes F1 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 90 apresentam-se os cinco provetes brancos do fabricante 1 (F1 B) após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.



F1 B 6 C



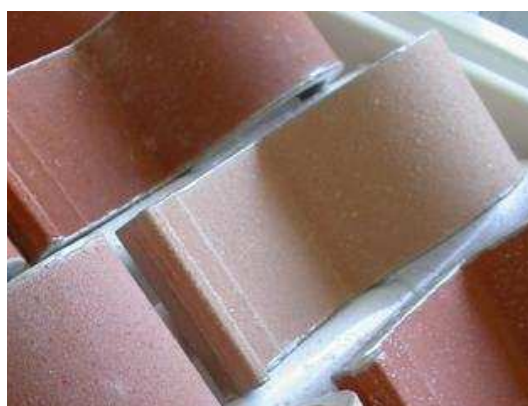
F1 B 7 C



F1 B 17 C



F1 B 13 C



F1 B 9 C

Figura 90 - Provetes F1 B após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 91 apresentam-se os cinco provetes vermelhos hidrofugados do fabricante 1 (F1 H) após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

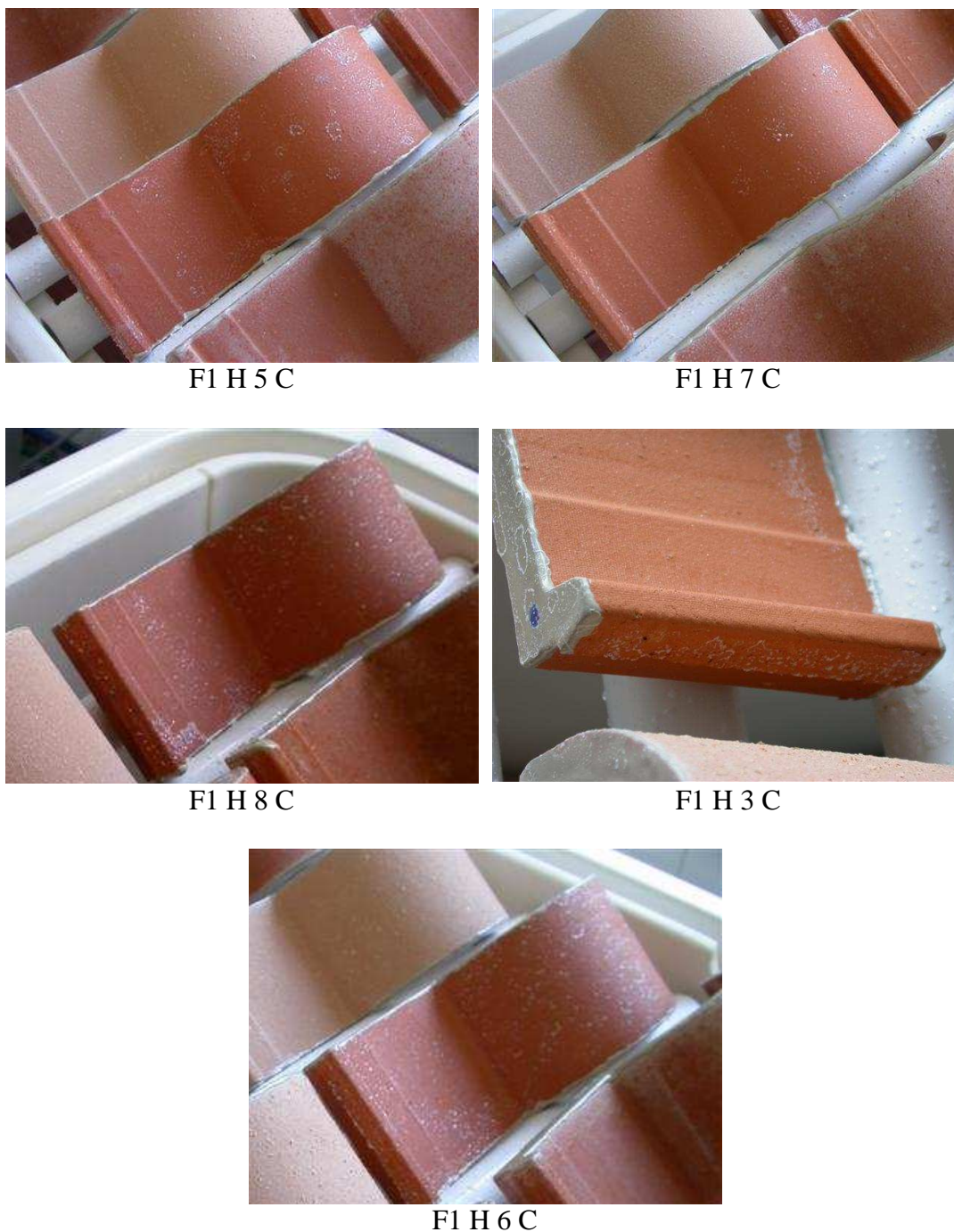


Figura 91 - Provetes F1 H após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

No Quadro 51 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao fim de 10 ciclos a todos os provetes, com a indicação do tipo de degradação observada, da área abrangida e do nível de degradação atingido. Apenas um dos provetes hidrofugados apresentava degradação visível e os provetes brancos estavam mais degradados do que os vermelhos.

Quadro 51 - Inspeção visual dos provetes do fabricante 1 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação	Âmbito da degradação	Nível da degradação
F1 NH	Picamento Desagregação granular	Generalizada	Baixo
F1 B	Picamento Desagregação granular Início da escamação	Generalizada	Baixo e médio
F1 H	Sem degradação (em 4 de 5 provetes) Fissura em 1 provete	Sem degradação Localizada, em 1 provete	Sem degradação Baixo, em 1 provete

Após 10 ciclos os provetes F1 NH 6 C, F1 B 9 C e F1 H 6 C foram substituídos pelos provetes F1 NH 14 C, F1 B 13 C e F1 H 3 C. Entre os ciclos 11 e 30 o ensaio incidiu, assim, sobre os provetes identificados na Figura 92.

F1 B 17 C

F1 H 7 C

F1 NH 9 C

F1 B 7 C

F1 H 5 C

F1 NH 5 C



F1 H 8 C

F1 NH 10 C

F1 B 13 C

F1 H 3 C

F1 NH 14 C

F1 B 6 C

Figura 92 - Provetes do fabricante 1 na câmara entre os ciclos 11 e 30

Nas figuras seguintes apresentam-se os 3 provetes de cada tipo sujeitos a 30 ciclos, após 20 ciclos e após 30 ciclos. Também se apresenta o provete de cada tipo que foi sujeito apenas a 20 ciclos.

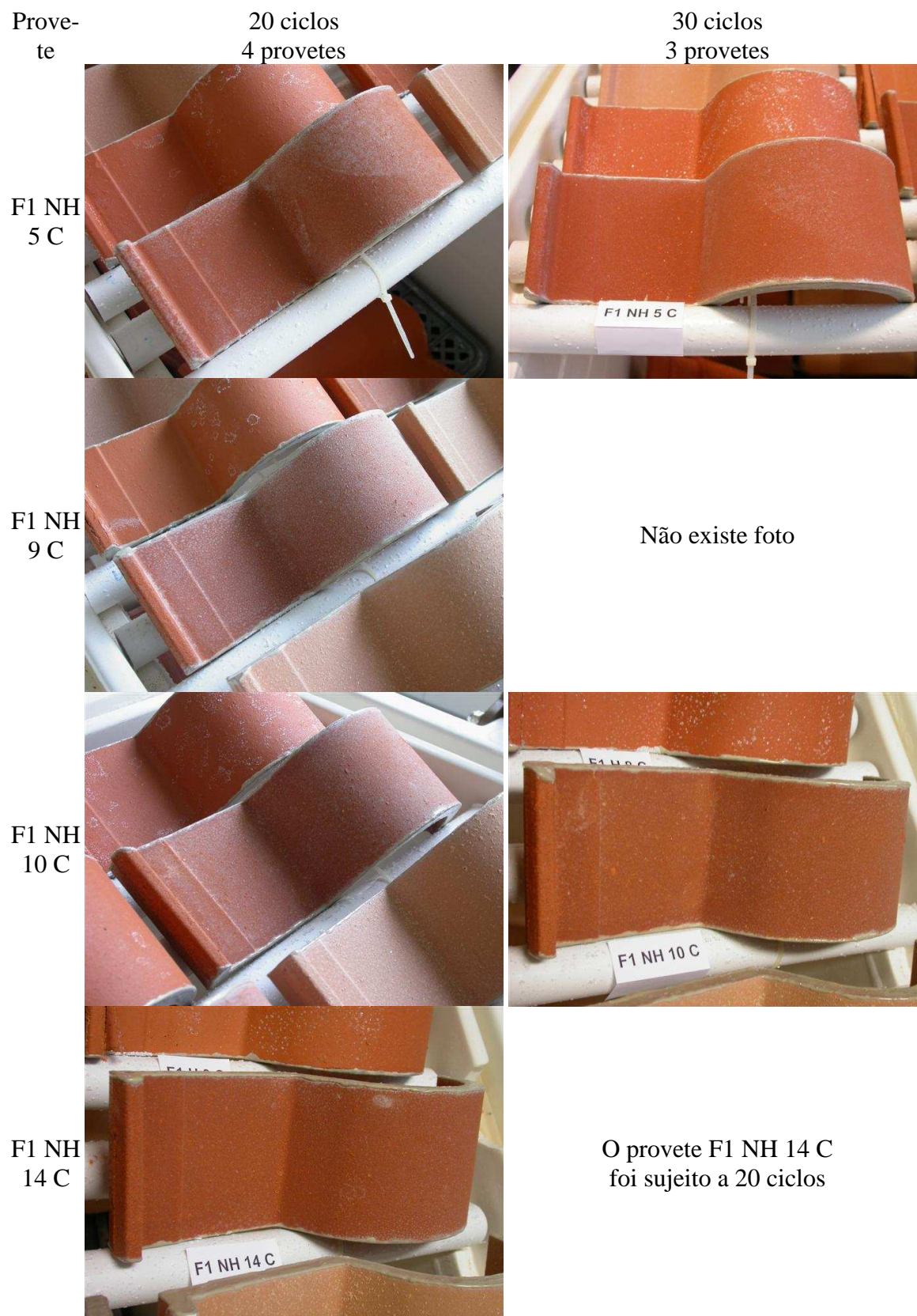


Figura 93 - Provetes F1 NH após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

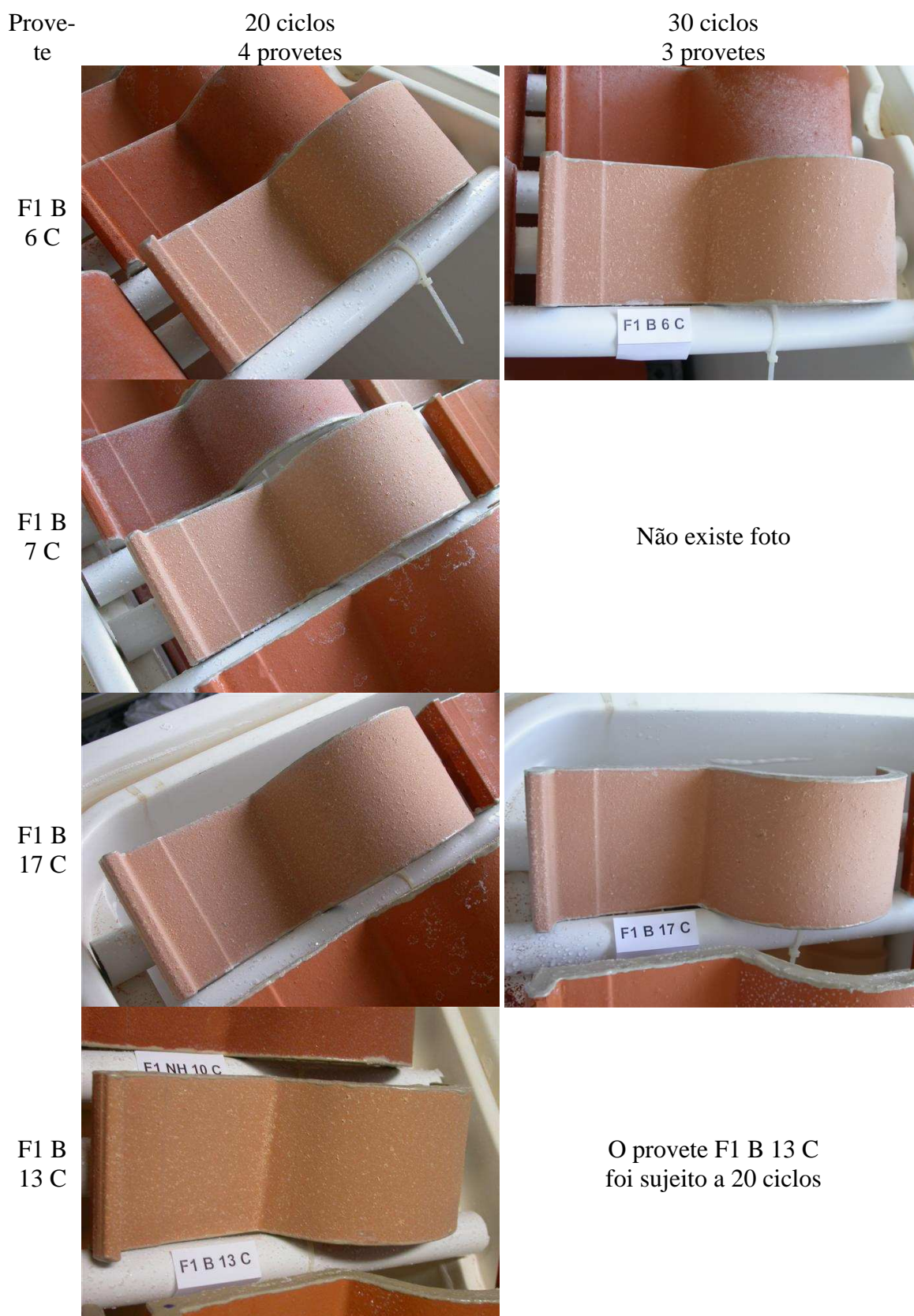


Figura 94 - Provetes F1 B após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

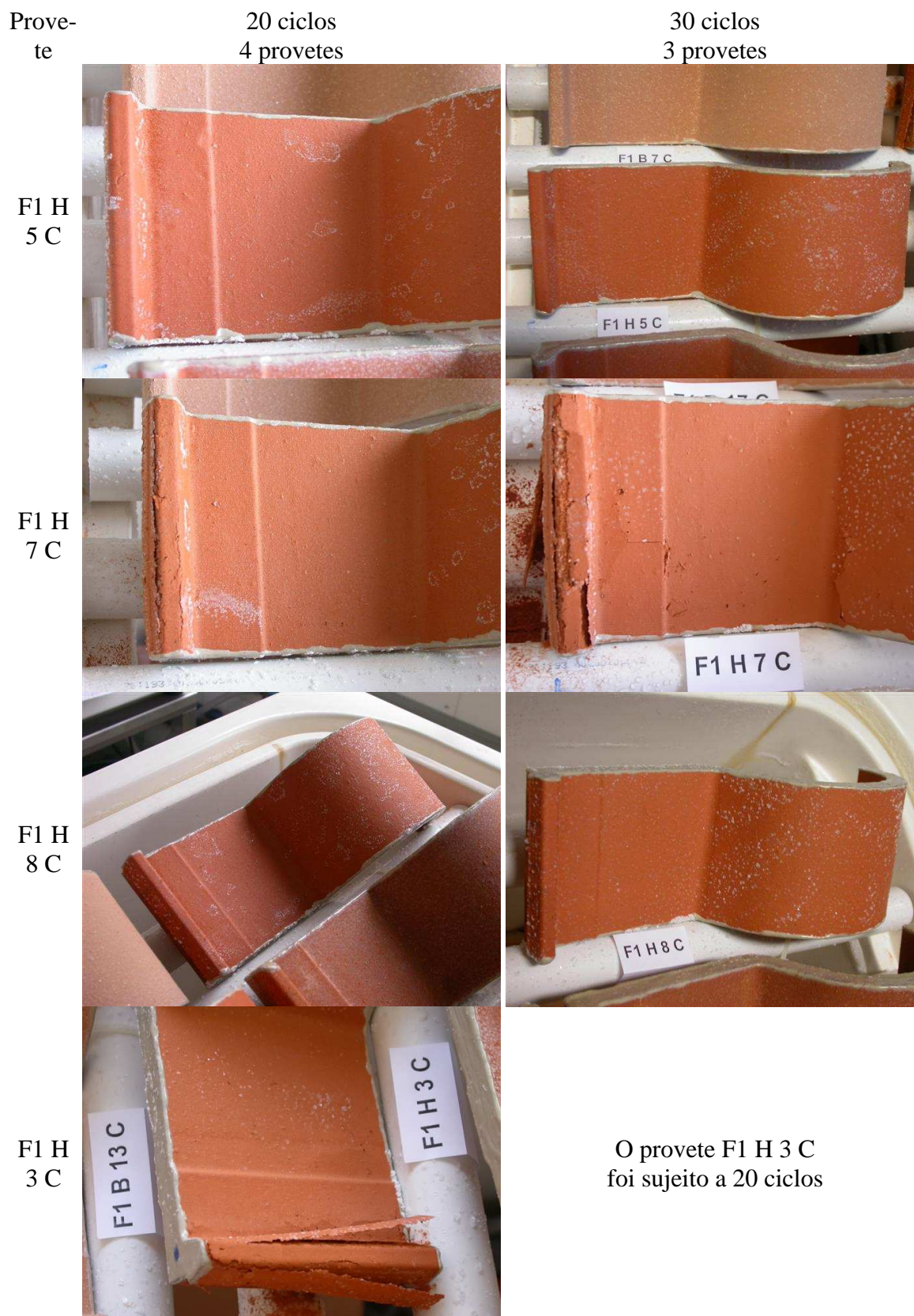


Figura 95 - Provetes F1 H após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

No Quadro 52 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao longo do ensaio. Complementando este quadro com a informação presente no Quadro 51 pode-se avaliar a evolução da degradação dos diversos provetes.

Quadro 52 - Inspeção visual dos provetes do fabricante 1 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação após 10 ciclos	Degradação após 20 ciclos			Degradação após 30 ciclos		
		Tipos	Âmbito	Nível	Tipos	Âmbito	Nível
F1 NH	Picamento	Picamento	Generalizada	Baixo	Picamento	Generalizada	Baixo
	Desagregação granular	Desagregação granular			Desagregação granular		
F1 B	Picamento	Picamento	Generalizada	Baixo e médio	Picamento	Generalizada	Baixo e médio
	Desagregação granular	Desagregação granular			Desagregação granular		
	Início da escamação	Escamação			Escamação		
F1 H	Sem degradação (em 4 de 5 provetes) Fissura em 1 provete	Sem degradação (em 2 de 4 provetes)	Localizada, em 2 provetes	Elevado, em 2 provetes	Sem degradação (em 2 de 3 provetes)	Generalizada, em 1 provete	Elevado, em 1 provete
		Fissuras			Fissuras		
		Empolamento			Empolamento		
		Plaquetas			Plaquetas		

A degradação observada nos provetes vermelhos não hidrofugados (F1 NH) foi sempre dos mesmos tipos (picamento e desagregação granular), generalizada e de nível baixo. Nestes provetes a degradação foi generalizada, evoluiu lentamente e não passou dum nível baixo.

Os provetes brancos (F1 B) apresentaram uma degradação visível já de nível médio. No ciclo 10, para além do picamento e da desagregação granular, também já se tinham formado escamas. Com o decorrer do ensaio a quantidade de escamas foi aumentando. A degradação foi sempre generalizada e não passou do nível médio.

O comportamento dos provetes hidrofugados (F1 H) foi distinto do dos provetes dos outros tipos. Ao fim de 10 ciclos apenas um dos cinco provetes ensaiados (Figura 91) apresentava degradação visível, na forma de uma fissura.

Com a continuação do ensaio foram quatro os provetes sujeitos a mais de 10 ciclos. Destes, dois continuaram a não apresentar degradação visível (F1 H 5 C e F1 H 8 C), ambos sujeitos a 30 ciclos. Os restantes dois provetes (F1 H 3 C e F1 H 7 C) apresentaram um elevado nível de degradação. O provete F1 H 3 C foi sujeito a 20 ciclos e F1 H 7 C foi sujeito a 30 ciclos.

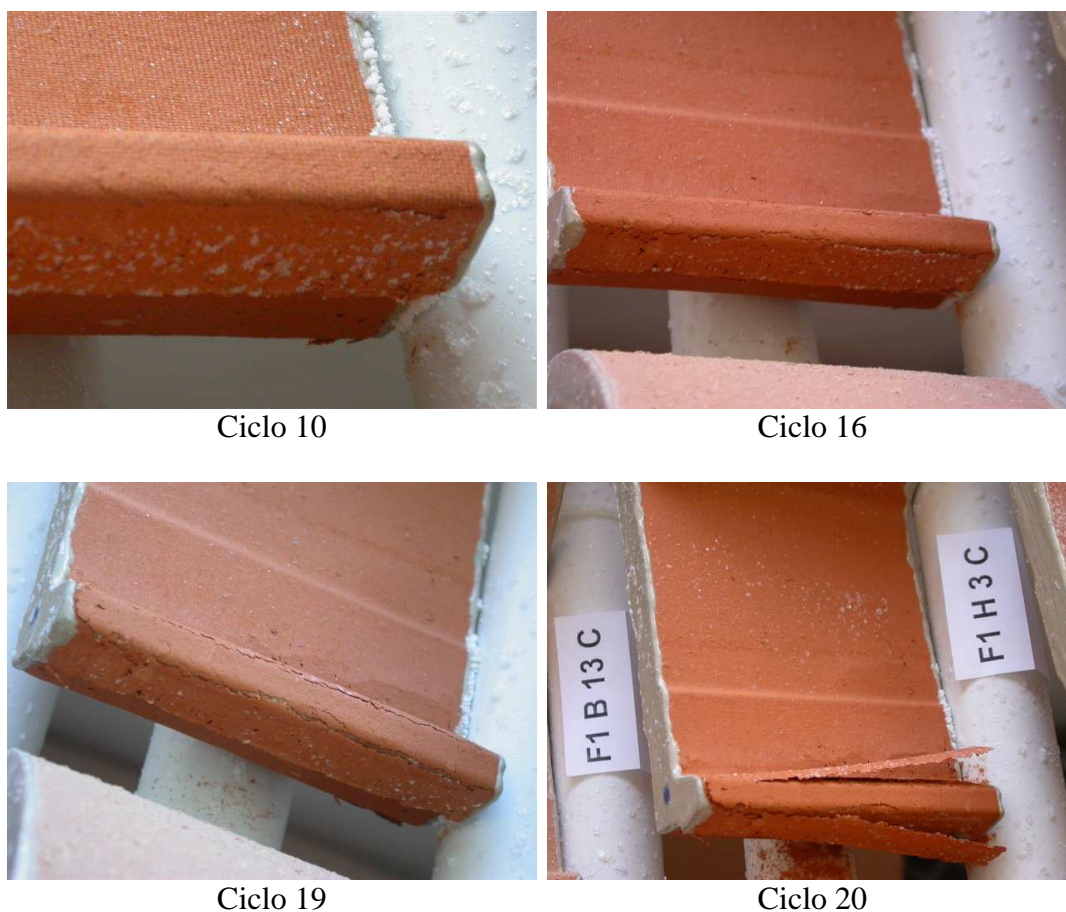


Figura 96 - Evolução da degradação do provete F1 H 3 C

Na Figura 96 apresenta-se a evolução da degradação do provete F1 H 3 C ao longo dos 20 ciclos de ensaio a que foi sujeito. A degradação visível iniciou-se com uma fissura numa aresta da junta. Esta fissura foi aumentando de extensão, permitindo assim a entrada de solução salina e a subsequente cristalização de sais sob a camada hidrofugada. O processo

de degradação foi evoluindo, dando origem à formação de plaquetas. Também é possível observar na aba o aparecimento de empolamento que foi aumentando e é a manifestação da ocorrência de cristalização de sais sob a camada hidrofugada.



Ciclo 15



Ciclo 20



Ciclo 26



Ciclo 27



Ciclo 29



Ciclo 30

Figura 97 - Evolução da degradação do provete F1 H 7 C

Na Figura 97 observa-se a evolução da degradação do provete F1 H 7 C, que foi sujeito a 30 ciclos de ensaio. Também neste caso se pode observar o início da degradação com o aparecimento na aresta da junta de uma fissura visível no ciclo 15. A degradação nesta zona foi progredindo, levando à formação de plaquetas. Também se pode observar na aba e no canudo o aparecimento de empolamento e de fissuras, associadas à cristalização de sais sob a camada hidrofugada.

Na Figura 98 apresentam-se pormenores do canudo do provete F1 H 7 C após os 30 ciclos de ensaio, onde também se podem ver fissuras e empolamento.

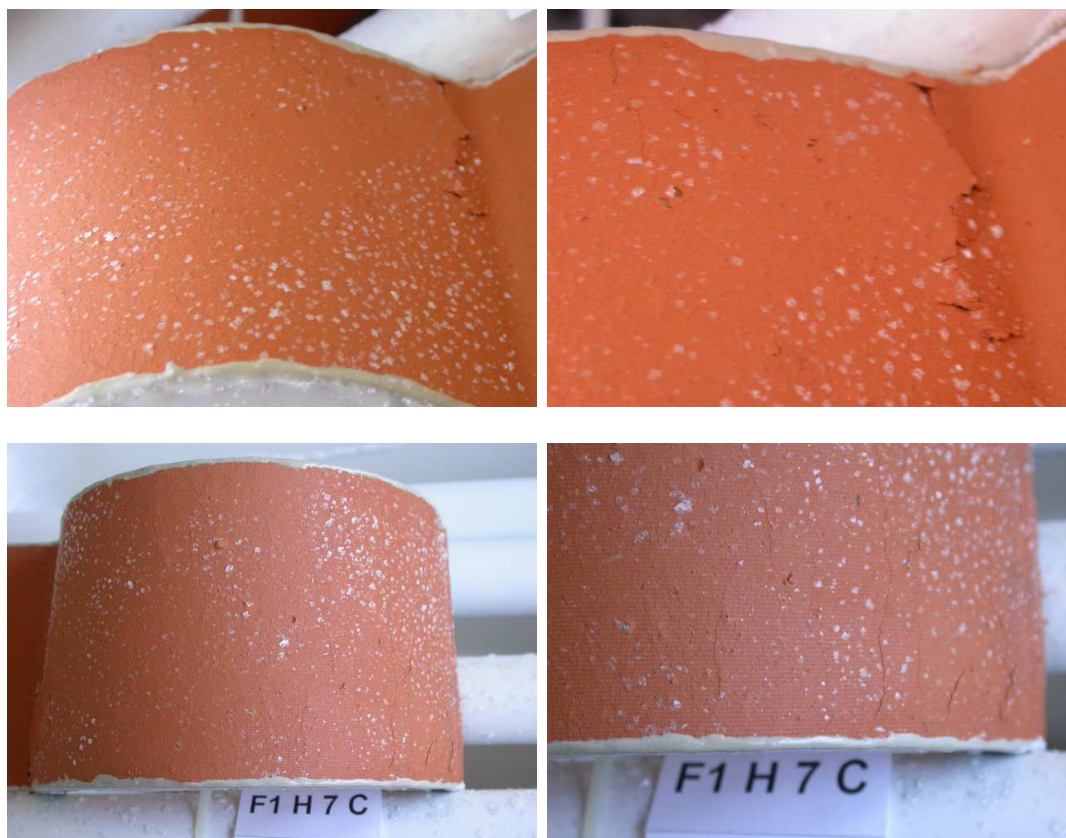


Figura 98 - Pormenores da degradação do provete F1 H 7 C após ensaio

Após o ensaio os provetes foram pincelados para retirar o material solto e também foi extraída a camada superficial já separada dos provetes. Confirmou-se a presença de cristais de sal sob a camada hidrofugada numa extensão até superior à dos empolamentos visíveis no fim do ensaio. A extensão das áreas afectadas das faces superiores é apresentada na Figura 99.

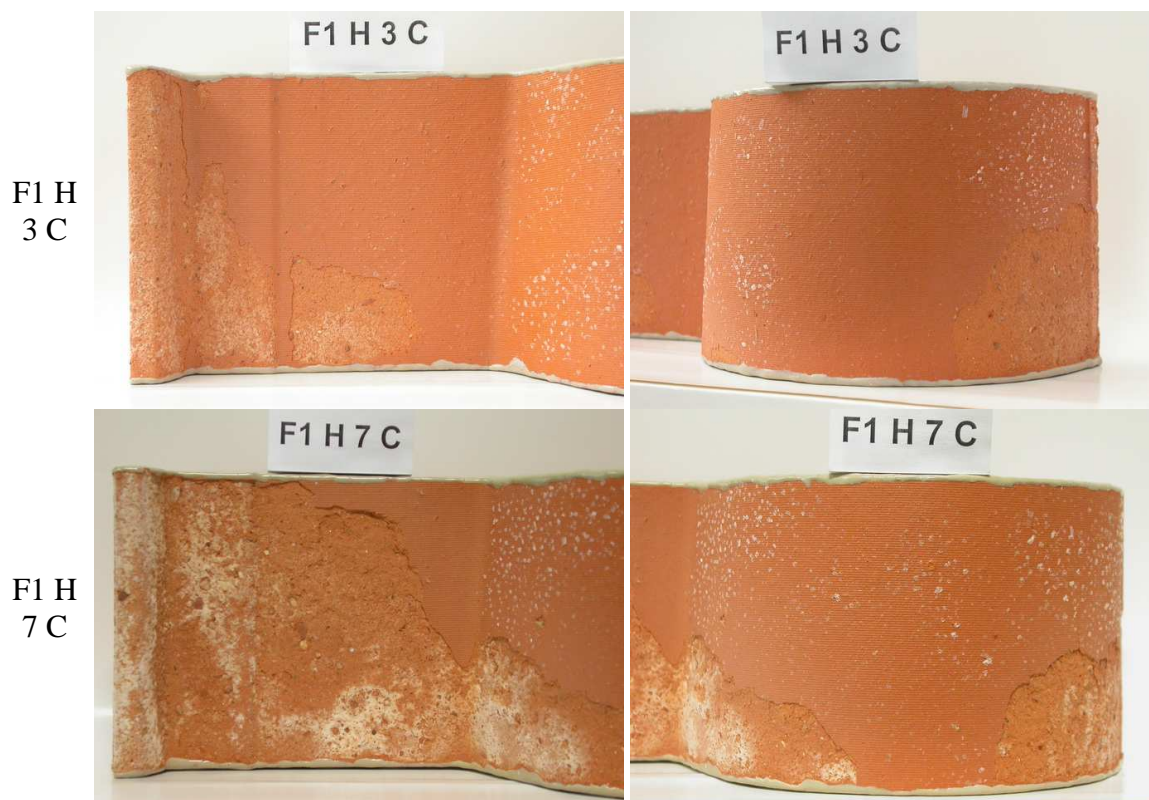


Figura 99 - Provetes F1 H 3 C e F1 H 7 C após ensaio, pincelagem e extracção da camada superficial degradada

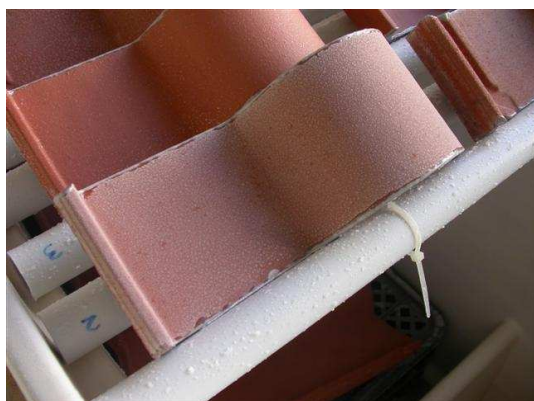
5.4.4.3 Ensaio cíclico de provetes do Grupo 1 do Fabricante 2

No início do ensaio dos provetes do primeiro grupo do fabricante 2 foram colocados na câmara os provetes identificados no Quadro 53 e dispostos na sequência apresentada. Estão indicados a negrito os provetes presentes na câmara apenas durante os primeiros 10 ciclos.

Quadro 53 - Provetes do grupo 1 do fabricante 2 colocados na câmara no início do ensaio

F2 T2 NH 11 C	F2 H 8 C
F2 H 6 C	F2 NH 11 C
F2 NH 5 C	F2 T2 NH 5 C
F2 T2 NH 10 C	F2 H 7 C
F2 H 3 C	F2 NH 8 C
F2 NH 4 C	F2 T2 NH 6 C

Nas figuras das páginas seguintes apresenta-se o estado de todos os provetes ao fim de 10 ciclos de ensaio, incluindo os provetes F2 NH 9 C, F2 T2 NH 3 C e F2 H 5 C, que estiveram na câmara entre os ciclos 11 e 30. Na Figura 100 apresentam-se os cinco provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 1 do fabricante 2 (F2 NH).



F2 NH 4 C



F2 NH 5 C



F2 NH 11 C



F2 NH 9 C



F2 NH 8 C

Figura 100 - Provetes F2 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 101 apresentam-se os provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH) após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

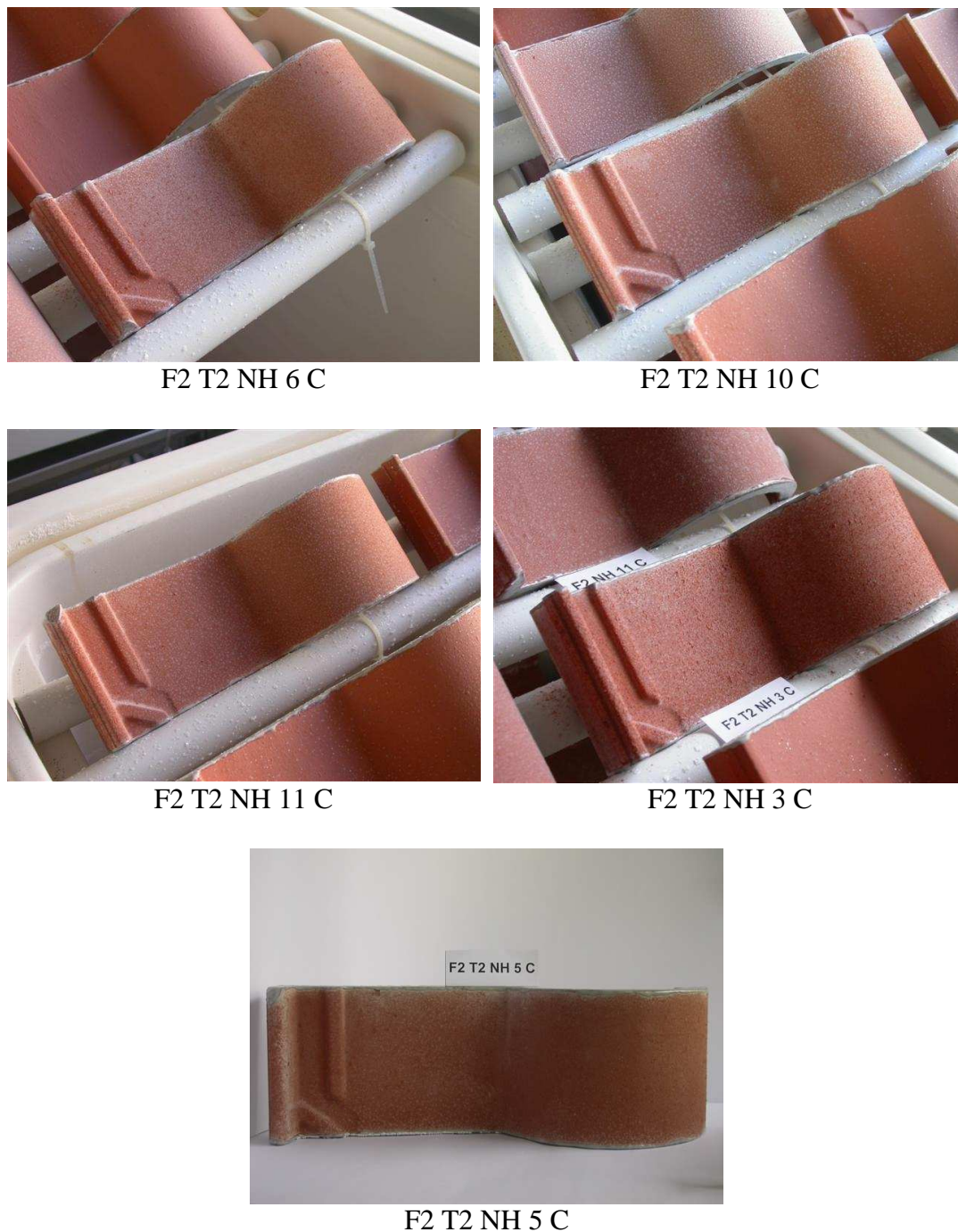


Figura 101 - Provetes F2 T2 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 102 apresentam-se os cinco provetes vermelhos hidrofugados do modelo 1 do fabricante 2 (F2 H) após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

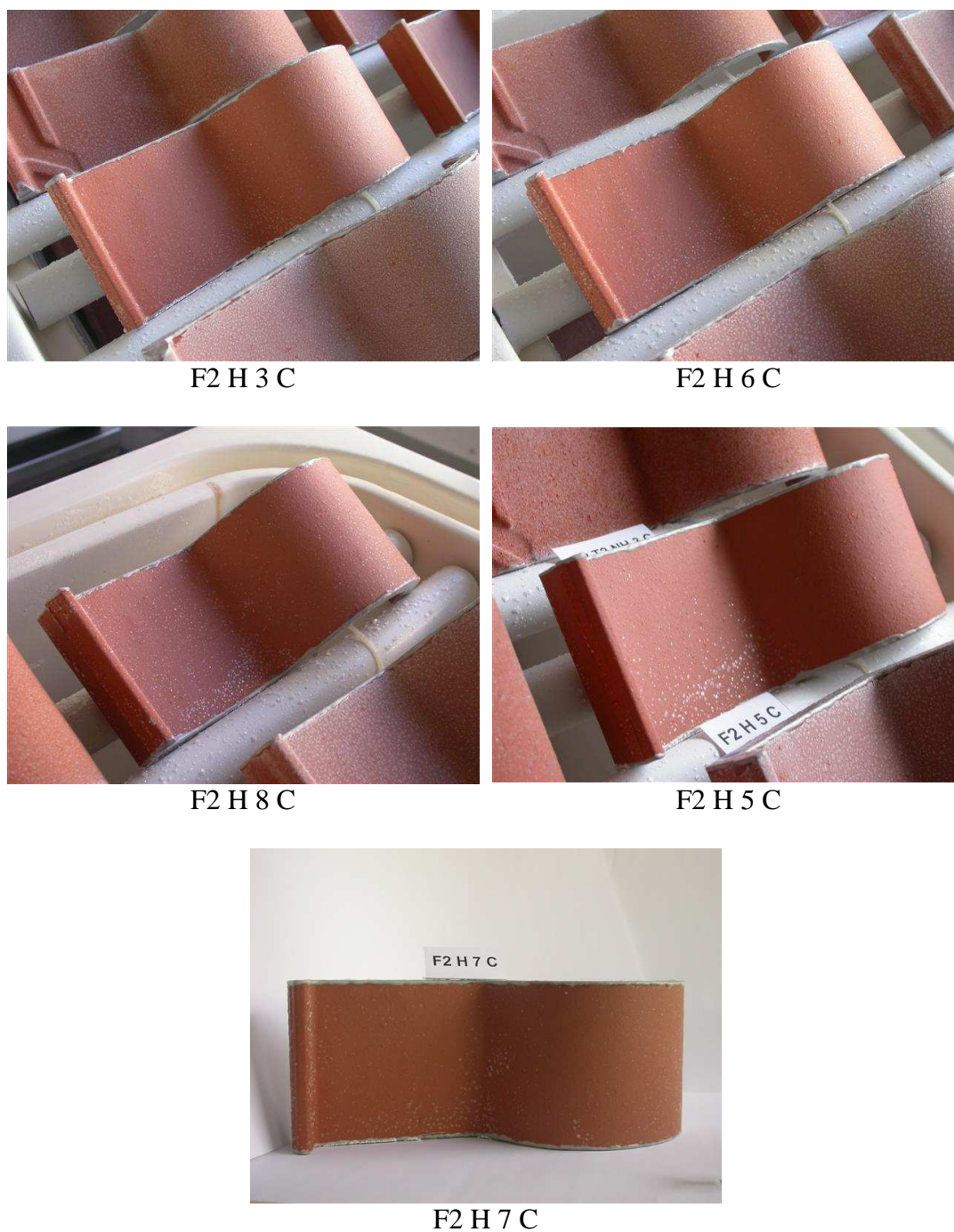


Figura 102 - Provetes F2 H após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

No Quadro 54 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao fim de 10 ciclos a todos os provetes do grupo 1 do fabricante 2, com a indicação do tipo de degradação observada, da área abrangida e do nível de degradação atingido.

Quadro 54 - Inspeção visual dos provetes do grupo 1 do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação	Âmbito da degradação	Nível da degradação
F2 NH	Início do picamento	Localizada	Baixo
F2 T2 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	Generalizada	Baixo e médio
F2 H	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação

Os provetes hidrofugados não apresentavam degradação visível. Os provetes do modelo 2 (F2 T2 NH) apresentavam-se mais degradados do que os provetes do modelo 1 (F2 NH), cuja degradação era localizada e de nível baixo na forma de picamento.

Após 10 ciclos os provetes F2 NH 8 C, F2 T2 NH 5 C e F2 H 7 C foram substituídos pelos provetes F2 NH 9 C, F2 T2 NH 3 C e F2 H 5 C, ficando na câmara entre os ciclos 11 e 30 os provetes identificados na Figura 103.

F2 T2 NH 11 C

F2 H 6 C

F2 NH 5 C

F2 T2 NH 10 C

F2 H 3 C

F2 NH 4 C



F2 H 8 C

F2 NH 11 C

F2 T2 NH 3 C

F2 H 5 C

F2 NH 9 C

F2 T2 NH 6 C

Figura 103 - Provetes do grupo 1 do fabricante 2 na câmara entre os ciclos 11 e 30

Na Figura 104 apresentam-se imagens, ao fim de 20 ciclos e de 24 ciclos, dos três provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 1 do fabricante 2 (F2 NH) que foram sujeitos a 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

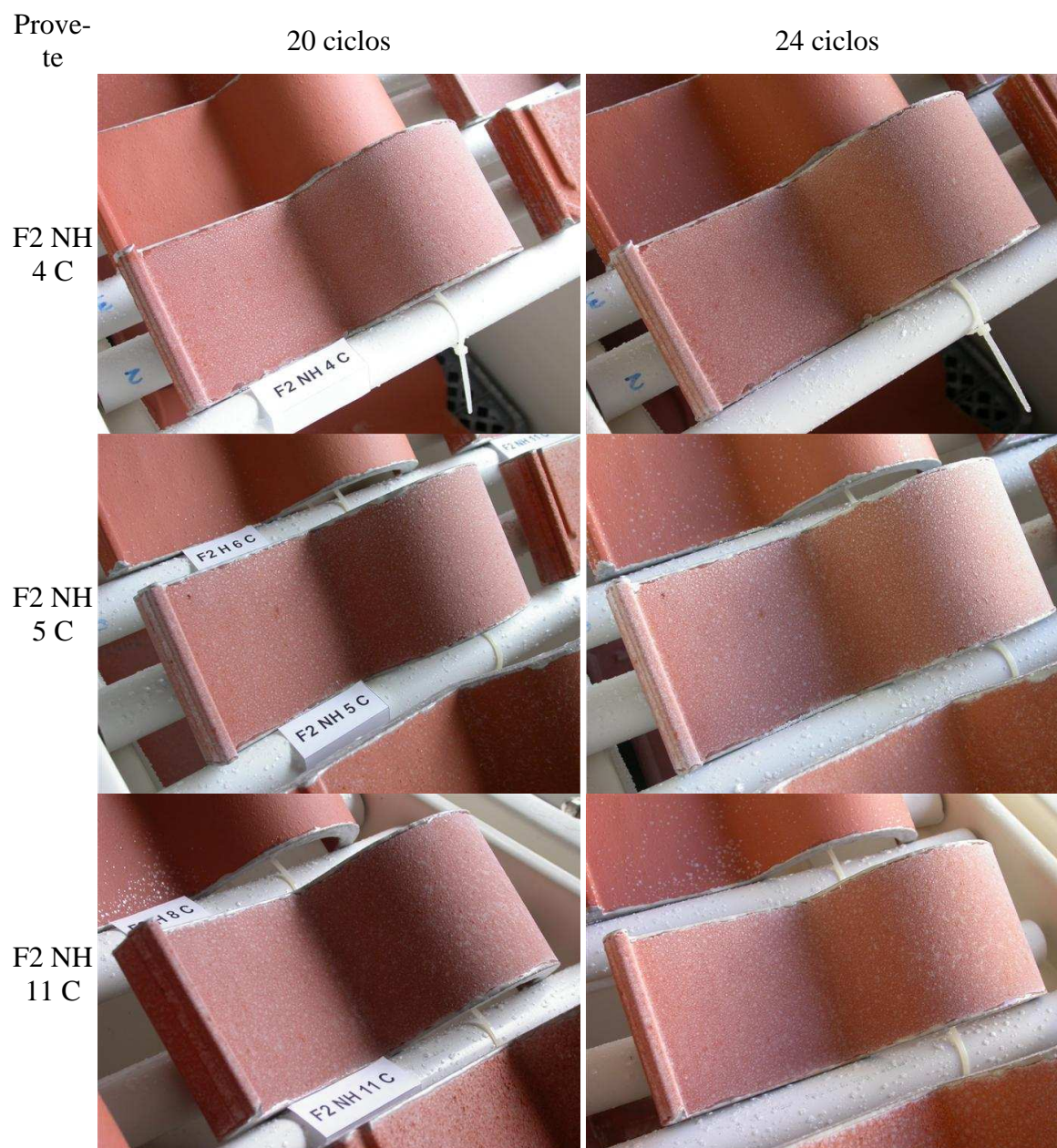


Figura 104 - Provetes F2 NH após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 105 apresentam-se imagens, ao fim de 20 ciclos e de 24 ciclos, dos três provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH) que foram sujeitos a 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

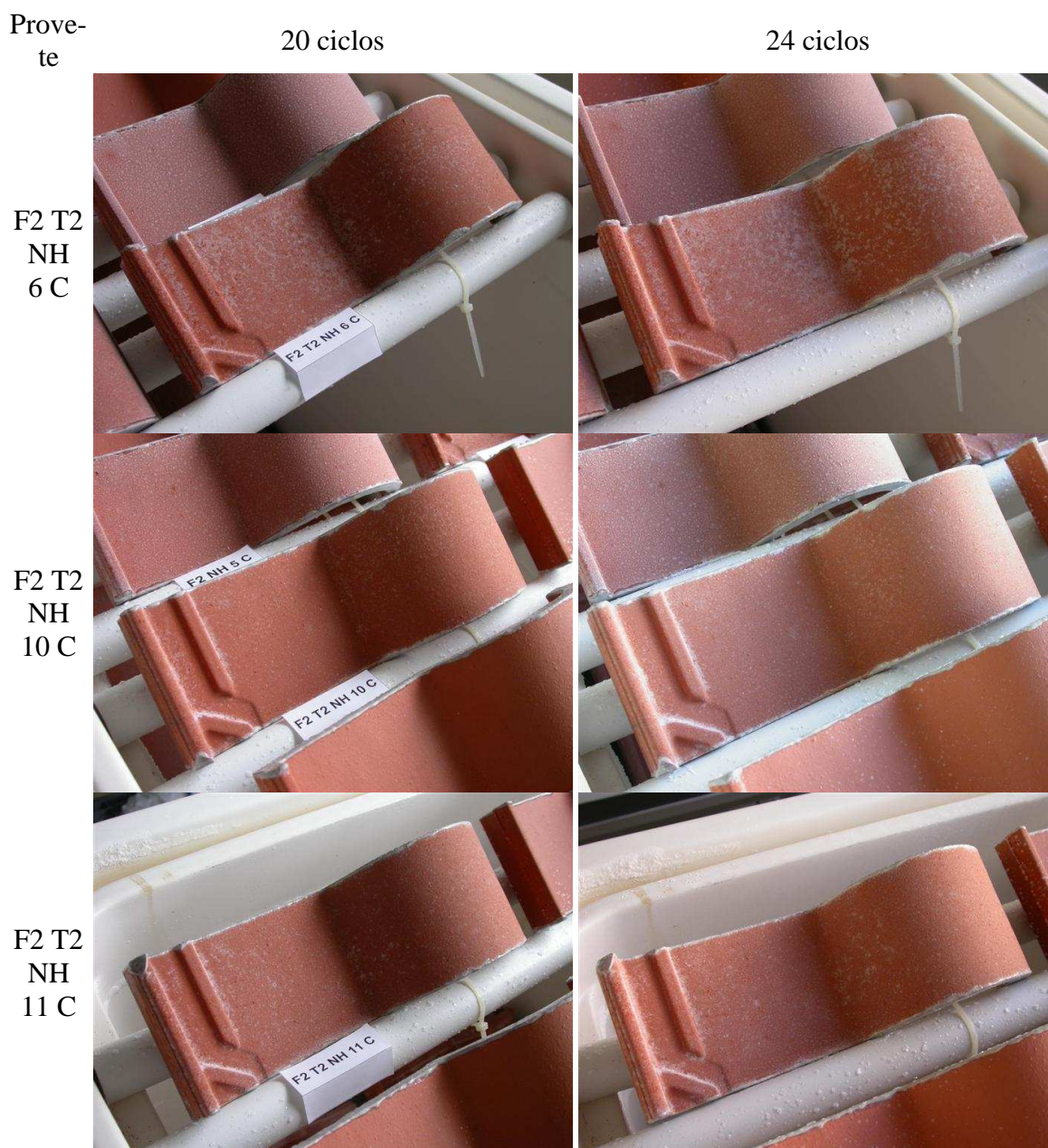


Figura 105 - Provetes F2 T2 NH após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 106 apresentam-se imagens, ao fim de 20 ciclos e de 24 ciclos, dos três provetes vermelhos hidrofugados do modelo 1 do fabricante 2 (F2 H) que foram sujeitos a 30 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem.

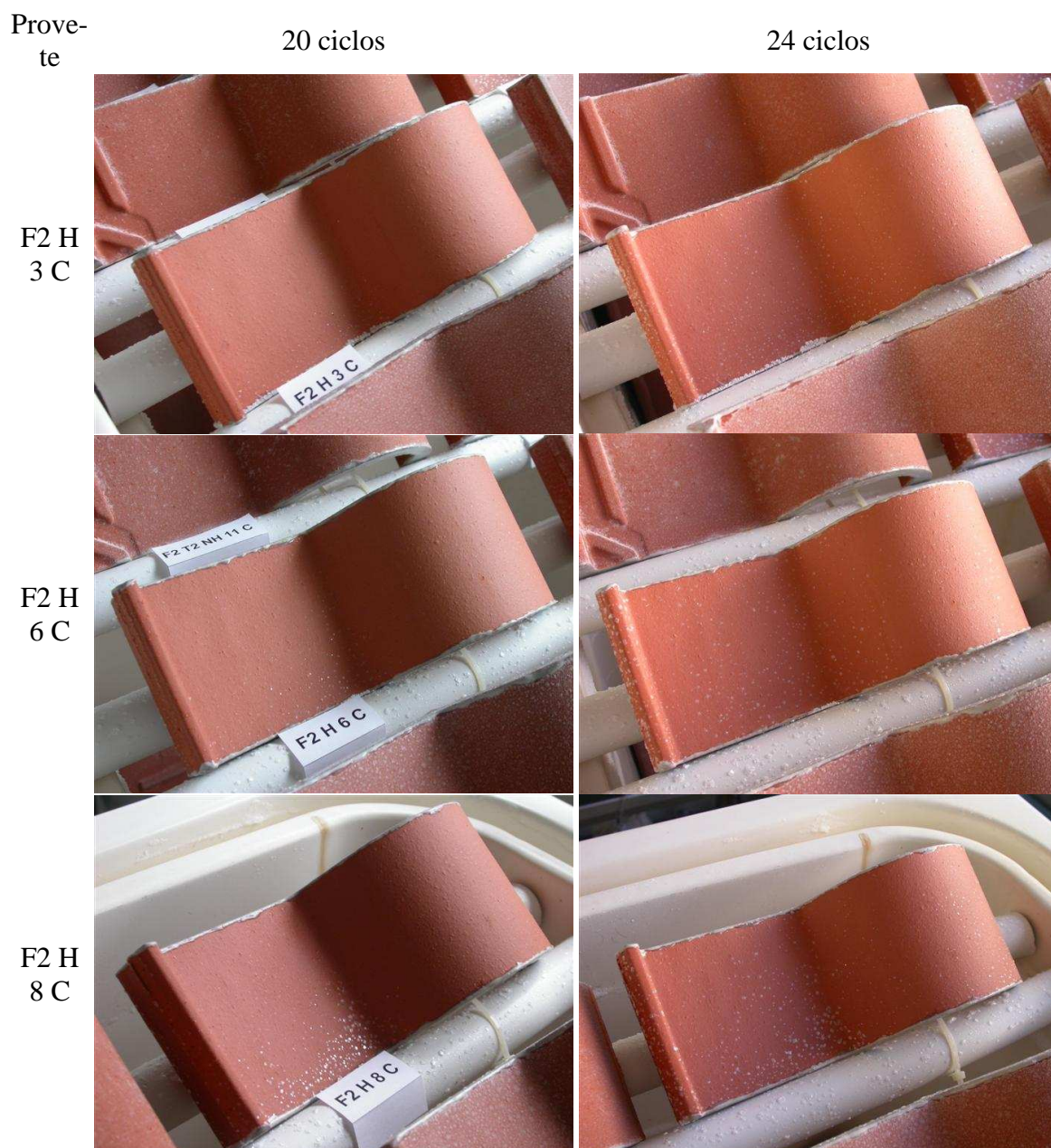


Figura 106 - Provetes F2 H após 20 e 24 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

No Quadro 55 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao longo do ensaio. Complementando este quadro com a informação presente no Quadro 54 pode-se avaliar a evolução da degradação dos diversos provetes.

Quadro 55 - Inspeção visual dos provetes do grupo 1 do fabricante 2 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação após 10 ciclos	Degradação após 20 ciclos			Degradação após 30 ciclos		
		Tipos	Âmbito	Nível	Tipos	Âmbito	Nível
F2 NH	Início do picamento	Picamento Desagregação granular	Generalizada	Baixo	Picamento Desagregação granular	Generalizada	Baixo
F2 T2 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	Picamento Desagregação granular Escamação	Generalizada	Baixo e médio	Picamento Desagregação granular Escamação	Generalizada	Baixo e médio
F2 H	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação	Sem degradação

A degradação observada nos provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 1 do fabricante 2 (F2 NH) evoluiu lentamente. Iniciou-se com picamento localizado e que foi evoluindo para picamento generalizado e degradação granular generalizada, mas sempre a um nível baixo.

Os provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH) apresentaram maior degradação do que os provetes dos outros dois tipos deste grupo. Após 10 ciclos já existia em todos os provetes picamento de âmbito generalizado, mas de nível baixo. Nalguns provetes já se observava degradação granular e num provete a degradação já era de nível médio, apresentando escamas. A degradação foi evoluindo lentamente ao longo dos ciclos e foi sempre generalizada. Nuns provetes o nível de degradação foi sempre baixo, tendo atingido noutros um nível médio.

Os provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H) continuaram a não apresentar degradação visível ao longo dos ciclos.

5.4.4.4 Ensaio cíclico de provetes do Grupo 2 do Fabricante 2

No início do ensaio dos provetes do segundo grupo do fabricante 2 foram colocados na câmara os provetes identificados na Figura 107. Estão indicados a negrito os provetes presentes na câmara apenas durante os primeiros 10 ciclos.



Figura 107 - Provetes do grupo 2 do fabricante 2 no início do ensaio

Nas figuras das páginas seguintes apresenta-se o estado de todos os provetes ao fim de 10 ciclos de ensaio, incluindo os provetes F2 B 6 C, F2 B 9 C, F2 T3 NH 11 C e F2 T3 NH 12 C, que estiveram na câmara entre os ciclos 11 e 30.

Na Figura 108 apresentam-se os oito provetes brancos do modelo 1 do fabricante 2 (F2 B) e na Figura 109 os oito provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH).

No Quadro 56 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao fim de 10 ciclos a todos os provetes do grupo 2 do fabricante 2, com a indicação do tipo de degradação observada, da área abrangida e do nível de degradação atingido.

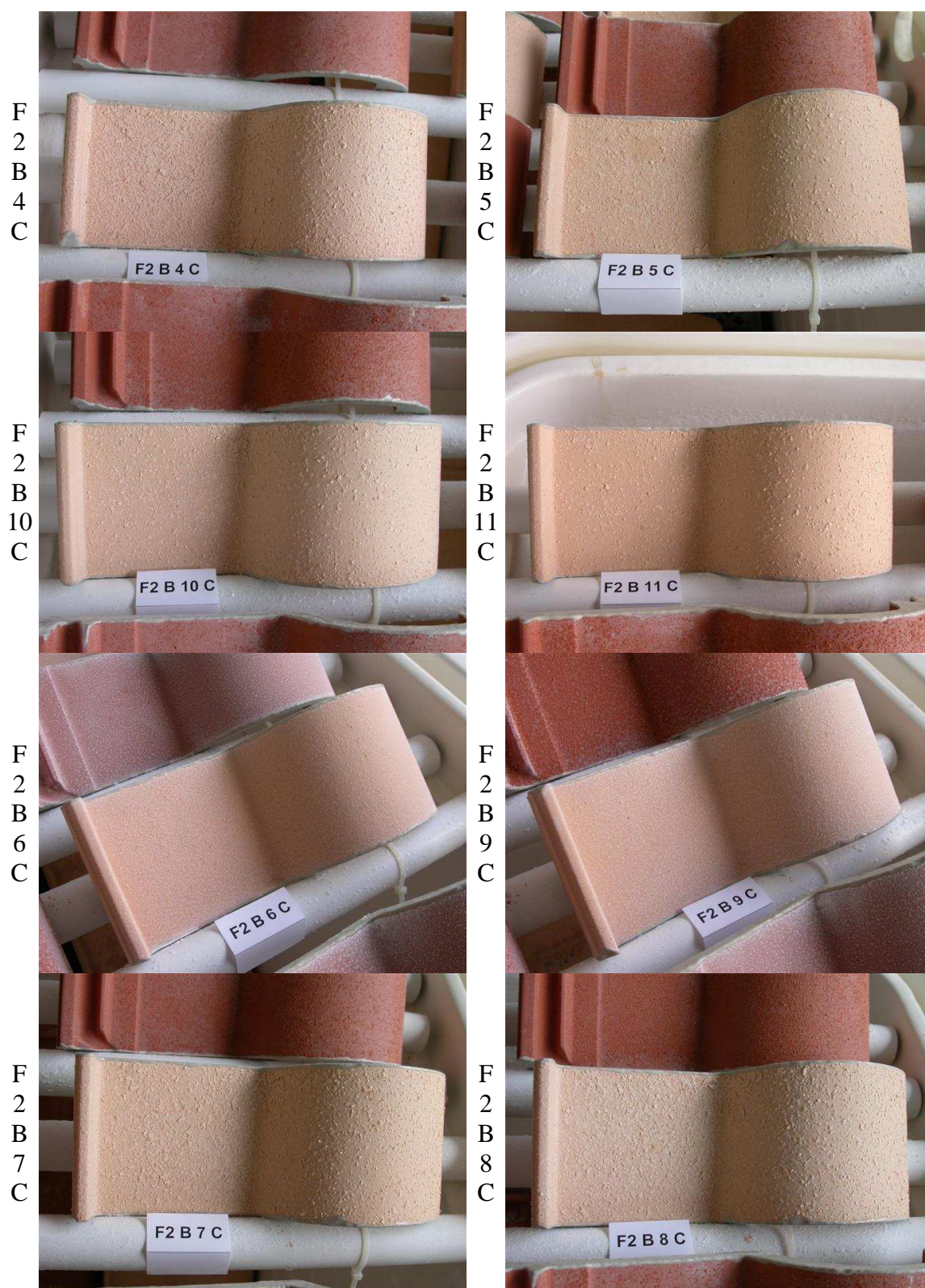


Figura 108 - Provetes F2 B após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

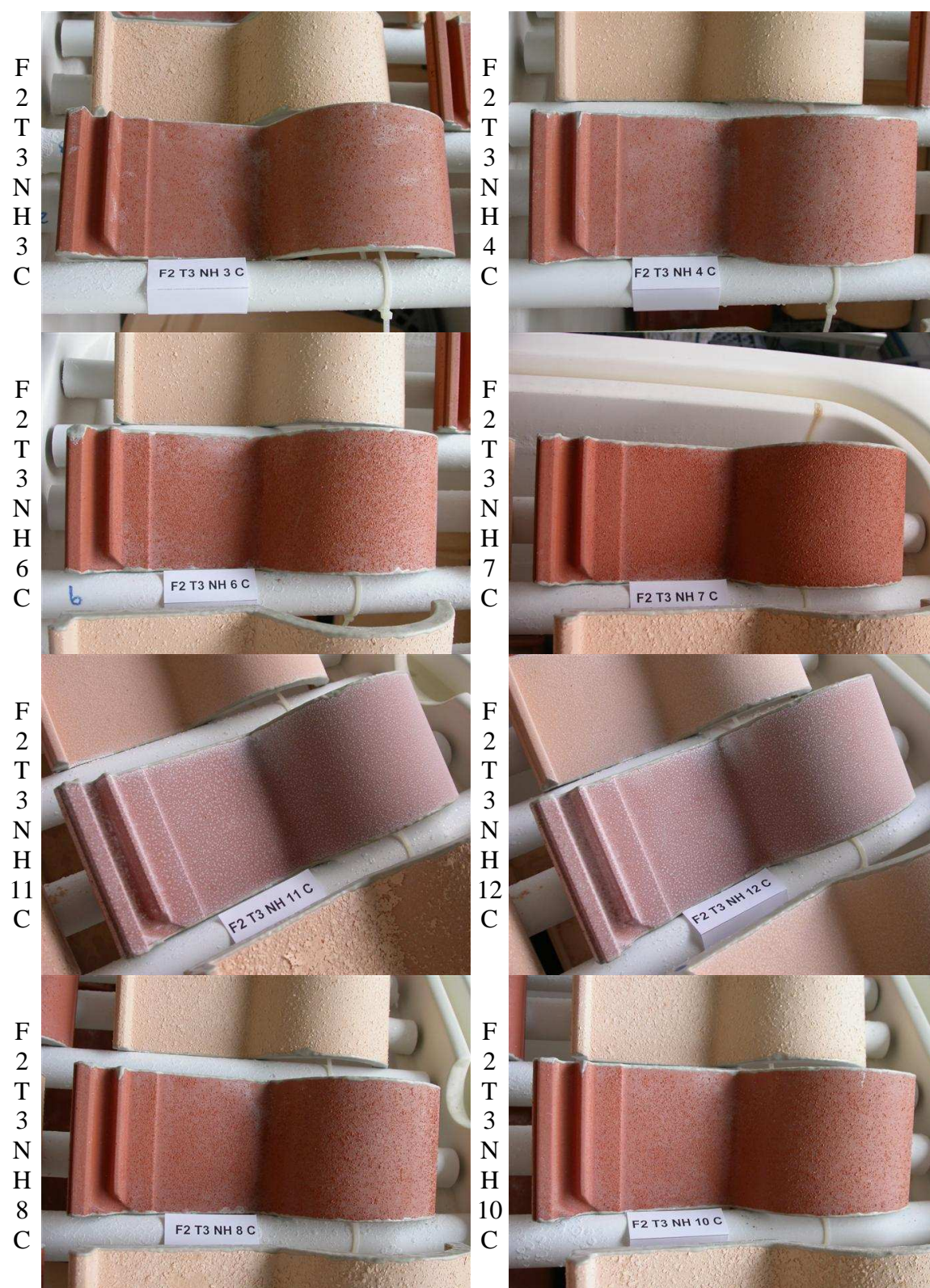


Figura 109 - Provetes F2 T3 NH após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Quadro 56 - Inspeção visual dos provetes do grupo 2 do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação	Âmbito da degradação	Nível da degradação
F2 B	Picamento	Generalizada	Baixo e médio
	Desagregação granular		
	Escamação		
F2 T3 NH	Picamento	Localizada e Generalizada	Baixo e médio
	Desagregação granular		
	Escamação		

Os provetes brancos do modelo 1 do fabricante 2 (F2 B) apresentavam-se mais degradados do que os provetes vermelhos do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH). As escamas dos provetes brancos já eram ao fim de 10 ciclos maiores e em maior quantidade do que as dos provetes vermelhos do modelo 3.

É de referir que os dois provetes de cada tipo sujeitos a 20 ciclos apresentavam uma degradação praticamente nula ao fim de 10 ciclos de exposição. São estes os provetes brancos com nível baixo de degradação, tendo os restantes provetes brancos já atingido um nível médio.

Nos provetes do modelo 3, para além dos dois provetes sujeitos a 20 ciclos, outros dois provetes apresentavam uma degradação de nível baixo ao fim de 10 ciclos de exposição. Pode-se considerar que os restantes 4 provetes do modelo 3 já tinham atingido um nível médio de degradação ao fim de 10 ciclos, apesar de inferior ao nível de degradação atingido pelos provetes brancos.

Após 10 ciclos os provetes F2 T3 NH 8 C, F2 T3 NH 10 C, F2 B 7 C e F2 B 8 C foram substituídos pelos provetes F2 T3 NH 11 C, F2 T3 NH 12 C, F2 B 6 C e F2 B 9 C, ficando na câmara entre os ciclos 11 e 30 os provetes identificados na Figura 110.



Figura 110 - Provete do grupo 2 do fabricante 2 na câmara entre os ciclos 11 e 30

Na Figura 111 apresentam-se imagens, ao fim de 10 ciclos e de 20 ciclos, dos dois provetes brancos do modelo 1 do fabricante 2 (F2 B) que foram sujeitos a 20 ciclos.

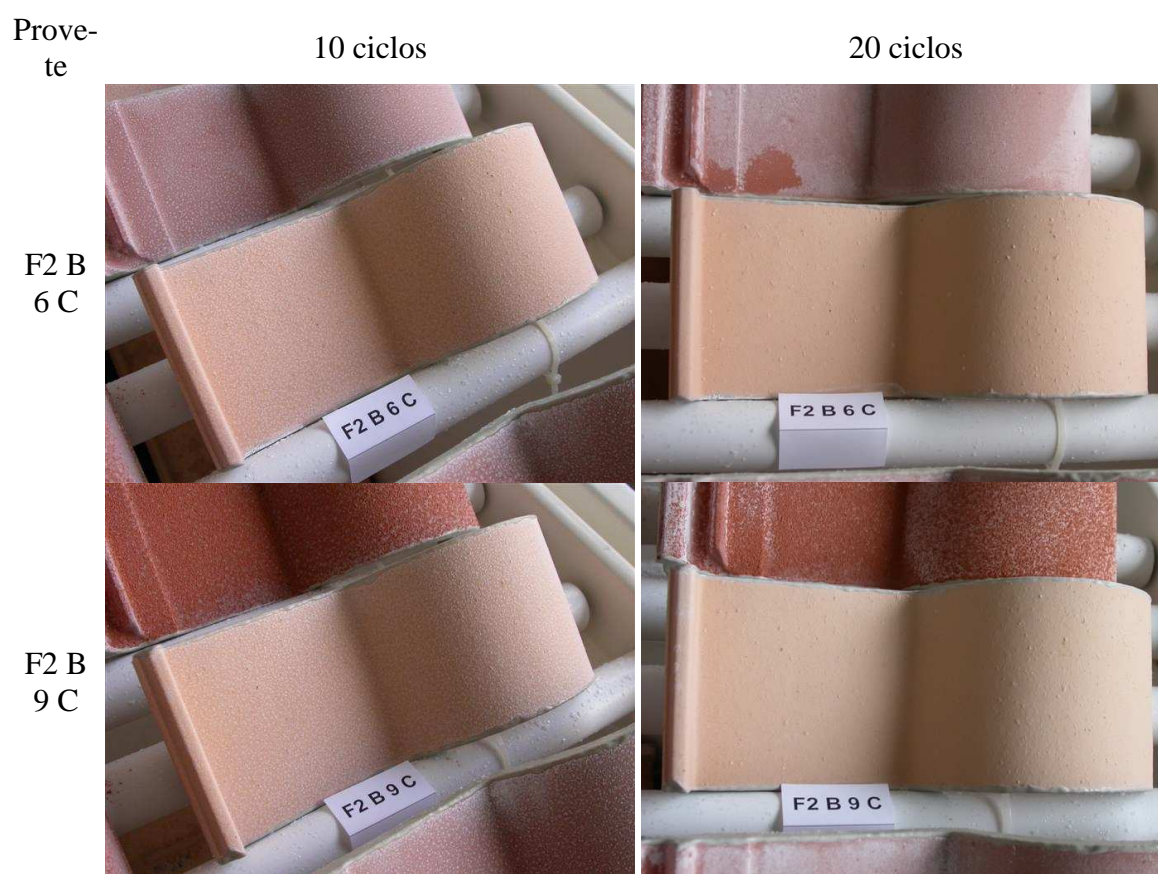


Figura 111 - Provete F2 B submetidos a 20 ciclos, após 10 e 20 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

Na Figura 112 apresentam-se imagens, ao fim de 10 ciclos e de 20 ciclos, dos dois provetes vermelhos não hidrofugados do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH) que foram sujeitos a 20 ciclos.

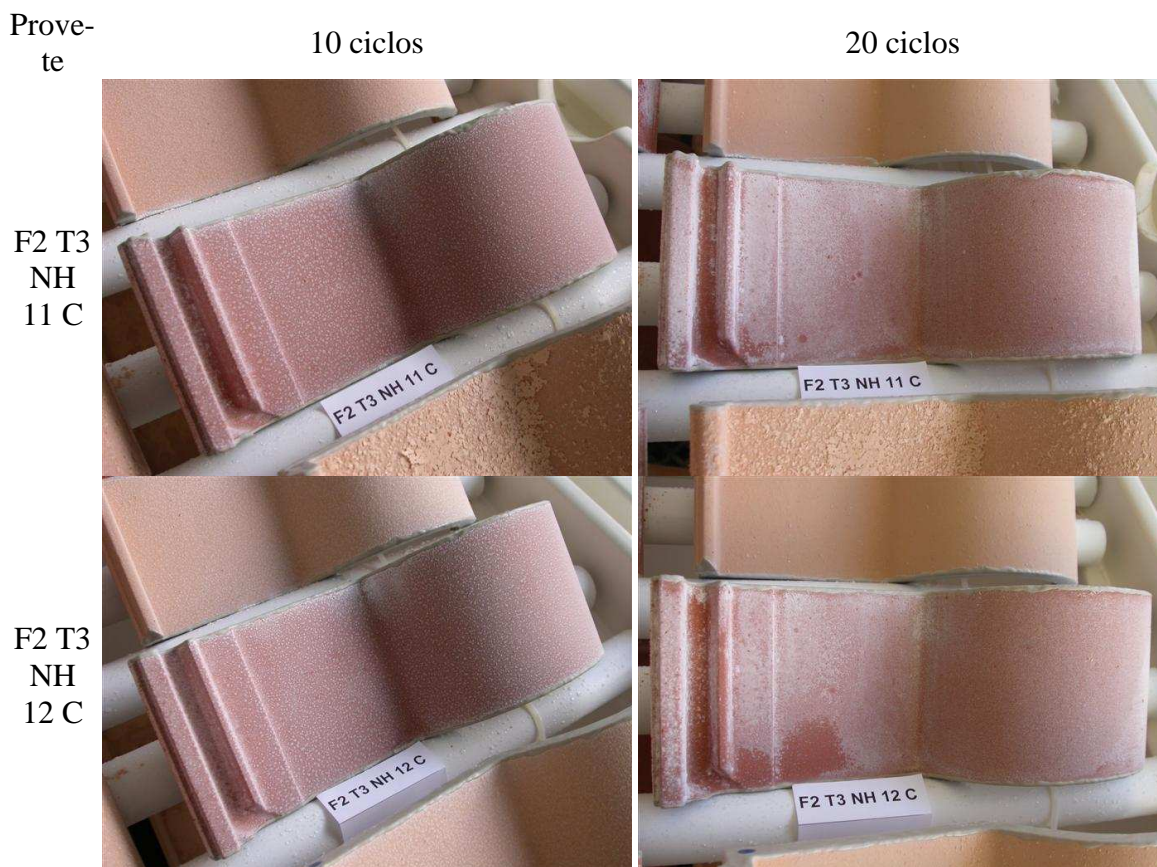


Figura 112 - Provetes F2 T3 NH submetidos a 20 ciclos, após 10 e 20 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem

A degradação dos provetes dos dois tipos que foram sujeitos a 20 ciclos evoluiu aparentemente muito pouco entre o ciclo 10 e o ciclo 20. Estes provetes já apresentavam uma degradação baixa ao fim de 10 ciclos. Após exposição a 20 ciclos a degradação continuou a ser baixa, na forma de picamento e alguma desagregação granular nos provetes brancos e algum picamento nos provetes vermelhos do modelo 3.

Na Figura 113 e na Figura 114 apresentam-se imagens, ao fim de 20 e de 30 ciclos, dos quatro provetes brancos do modelo 1 do fabricante 2 (F2 B) e dos quatro provetes vermelhos do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH) que foram sujeitos a 30 ciclos.

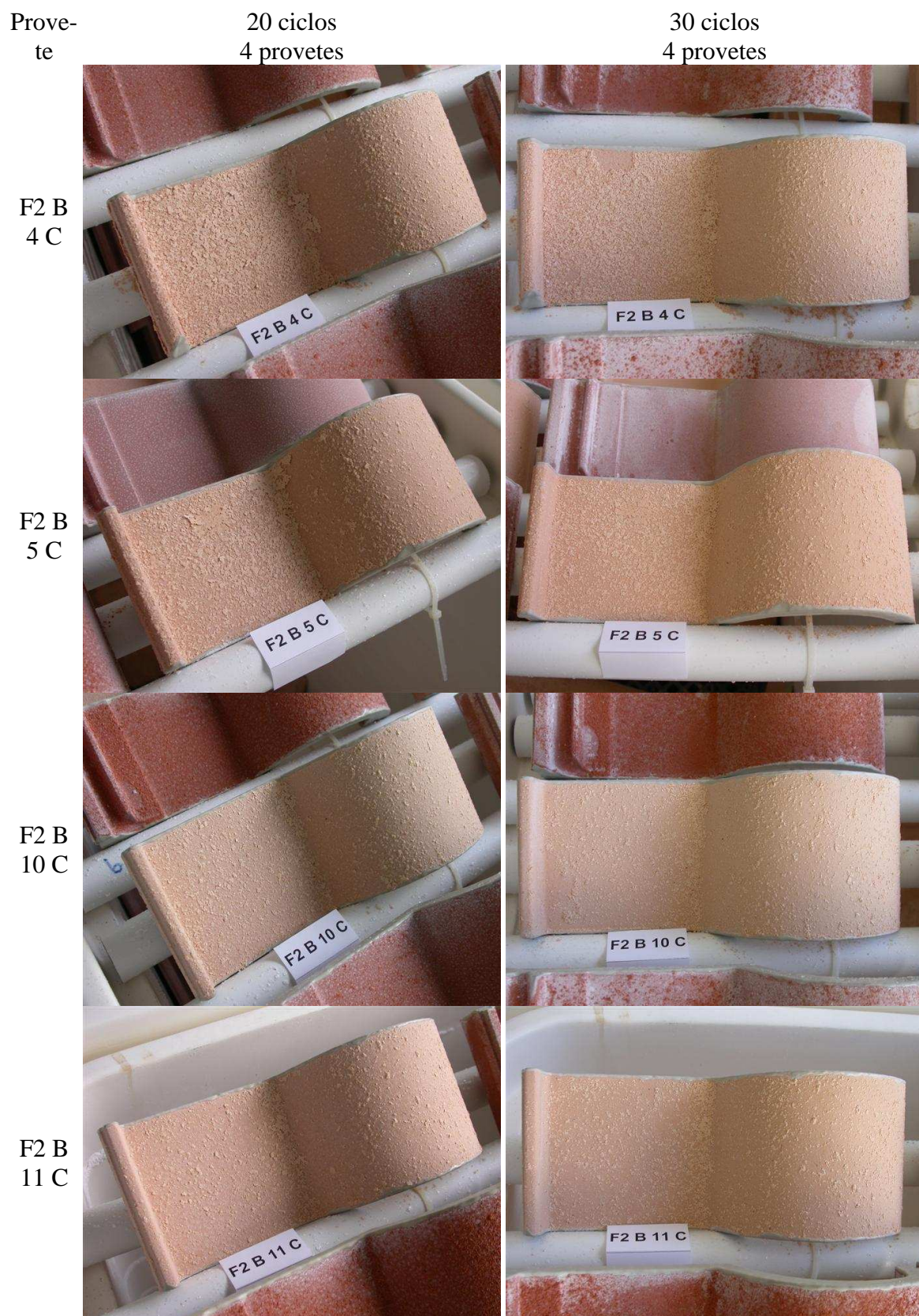


Figura 113 - Provetes F2 B submetidos a 30 ciclos após 20 e 30 ciclos de nevoeiro salino

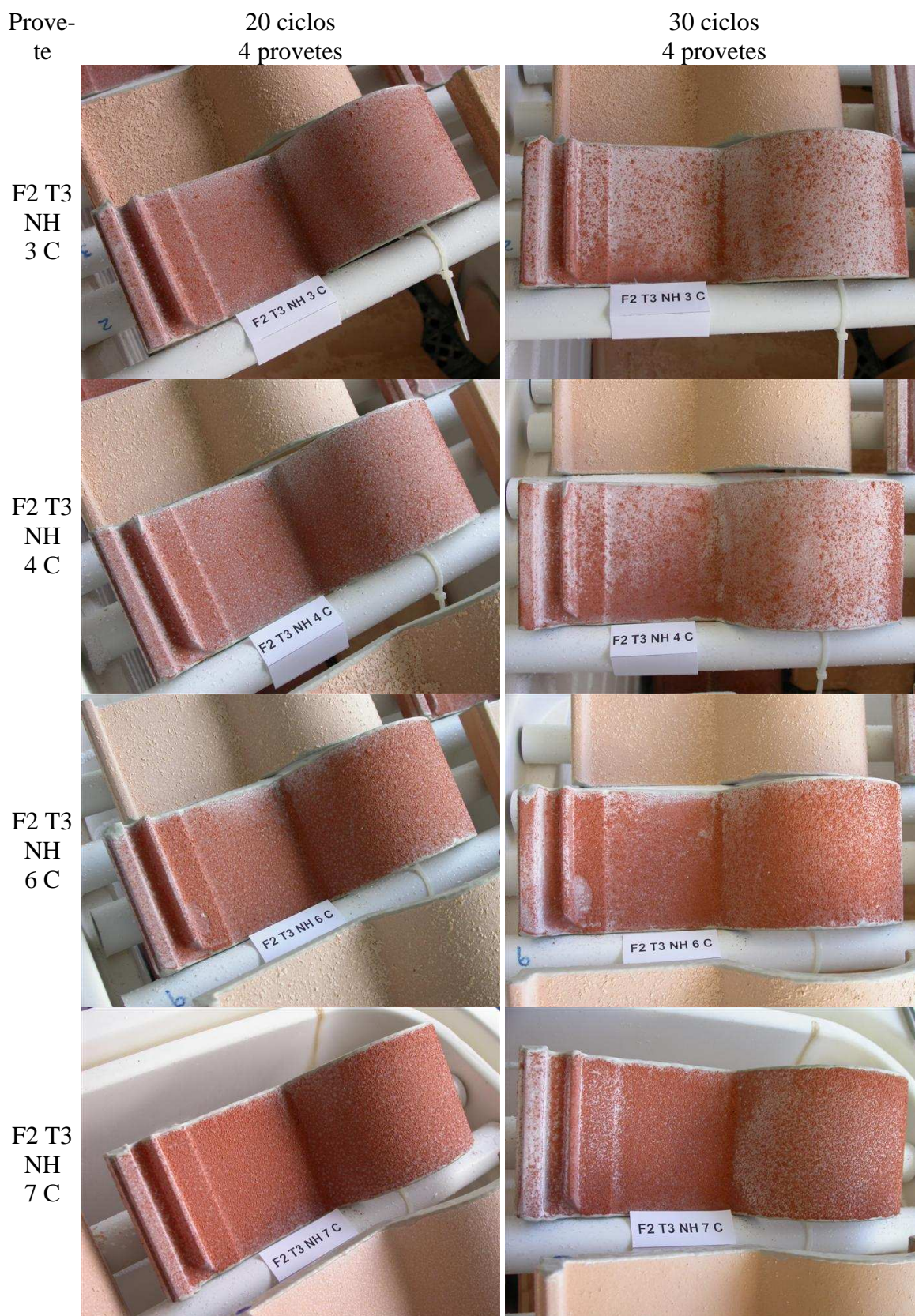


Figura 114 - Provetes F2 T3 NH submetidos a 30 ciclos após 20 e 30 ciclos de nevoeiro

No Quadro 57 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada ao longo do ensaio. Complementando este quadro com a informação presente no Quadro 56 pode-se avaliar a evolução da degradação dos diversos provetes.

Quadro 57 - Inspeção visual dos provetes do grupo 2 do fabricante 2 após 10, 20 e 30 ciclos de nevoeiro/secagem

Tipo de provetes	Tipos de degradação após 10 ciclos	Degradação após 20 ciclos			Degradação após 30 ciclos		
		Tipos	Âmbito	Nível	Tipos	Âmbito	Nível
F2 B	Picamento	Picamento			Picamento		
	Desagregação granular	Desagregação granular	Generalizada	Baixo e médio	Desagregação granular	Generalizada	Médio
	Escamação	Escamação			Escamação		
F2 T3 NH	Picamento	Picamento	Localizada e Generalizada	Baixo e médio	Picamento	Generalizada	Médio
	Desagregação granular	Desagregação granular			Desagregação granular		
	Escamação	Escamação			Escamação		

Os provetes brancos (F2 B) foram os que se degradaram mais de todos os do fabricante 2. Forem estes os provetes em que se formaram maiores quantidades de grânulos e de escamas e cujas escamas tinham maior dimensão. A evolução da degradação ao longo dos ciclos foi maior nestes provetes, observando-se que essa evolução foi superior nos primeiros 20 ciclos e menos significativa entre o ciclo 20 e o ciclo 30. O nível baixo de degradação foi obtido apenas nos provetes sujeitos a 20 ciclos.

A evolução da degradação dos provetes do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH) foi mais lenta e atingiu níveis inferiores. Apesar dos tipos de degradação observados serem iguais aos dos provetes brancos e do nível de degradação também ser médio ao fim de 30 ciclos, as escamas que se formaram nos provetes F2 T3 NH eram de menor dimensão e em menor quantidade.

Os provetes F2 B com nível baixo de degradação após 20 ciclos de exposição eram apenas os que foram sujeitos a 20 ciclos enquanto todos os provetes que foram sujeitos a 30 ciclos já apresentavam um nível médio de degradação. Nos provetes F2 T3 NH, para além dos

provetes sujeitos a apenas 20 ciclos, alguns dos provetes sujeitos a 30 ciclos também apresentavam um nível baixo de degradação ao fim de 20 ciclos. Nestes a degradação evoluiu para nível médio entre os ciclos 20 e 30.

Após 20 ciclos os provetes F2 T3 NH que foram sujeitos a apenas 20 ciclos apresentavam degradação localizada e de nível baixo. Os que continuaram até aos 30 ciclos apresentavam ao fim de 20 ciclos degradação generalizada, uns com nível baixo e outros com nível médio.

A evolução da degradação dos provetes F2 T3 NH manifestou-se pelo aparecimento de um maior número de grânulos e de escamas, sem nunca atingir as quantidades observadas nos provetes F2 B.

5.4.4.5 Conclusões relativas ao ensaio cíclico de envelhecimento acelerado

Os ensaios cíclicos de envelhecimento acelerado causaram diferentes tipos e níveis de degradação nos oito tipos de provetes ensaiados.

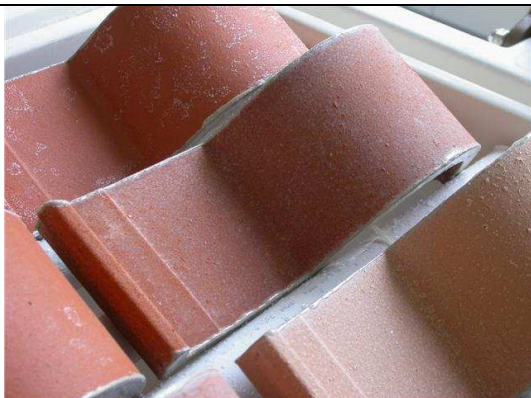



No Quadro 58 e no Quadro 59 são apresentadas as formas de alteração e degradação observadas nos diversos tipos de provetes do fabricante 1 e do fabricante 2.

Os provetes não hidrofugados, brancos e vermelhos, de ambos os fabricantes apresentaram níveis baixos ou médios de degradação, dos tipos picamento, desagregação granular e escamação. Os provetes brancos aparentaram maior grau de degradação.





A maior parte dos provetes hidrofugados não apresentavam degradação visível após o número de ciclos a que foram sujeitos, no entanto alguns provetes do fabricante 1 sofreram forte degradação, superior mesmo à de todos os outros tipos de provetes. Os provetes hidrofugados do fabricante 2 aparentemente são mais resistentes ao envelhecimento do que os hidrofugados do fabricante 1.

Para tentar atingir níveis mais elevados de degradação os provetes não hidrofugados foram sujeitos a um ensaio composto de envelhecimento acelerado descrito em 5.4.5.

Quadro 58 - Formas de alteração e degradação - provetes do fabricante 1

Tipo de provetes	Degradação	Exemplos	
F1 NH	Picamento Desagregação granular		
F1 B	Picamento Desagregação granular Escamação		
F1 H	Sem degradação Fissuras		
	Empolamento Plaquetas		

Quadro 59 - Formas de alteração e degradação - provetes do fabricante 2

Tipo de provetes	Degradação	Exemplos
F2 NH	Picamento Desagregação granular	
F2 B	Picamento Desagregação granular Escamação	
F2 H	Sem degradação	---
F2 T2 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	
F2 T3 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	

5.4.5 Ensaio composto de envelhecimento acelerado

5.4.5.1 Descrição do ensaio

O principal objectivo do ensaio composto é averiguar a possibilidade de obter maiores níveis de degradação nos provetes de telhas cerâmicas sujeitos a ensaio em câmara de nevoeiro salino.

Para tentar atingir este objectivo foram introduzidas alterações nos procedimentos já utilizados nos ensaios anteriores e incluídas novas operações.

Antes do ensaio composto foram tomadas algumas decisões que tiveram em conta o comportamento dos provetes e a informação obtida nos diversos ensaios cíclicos anteriores. A informação obtida no decorrer do ensaio composto também foi tida em conta na sequência e duração das operações realizadas nas diversas fases deste ensaio.

A duração dos ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem é igual à dos ciclos de 24 horas dos ensaios cíclicos (8 horas de nevoeiro salinos + 16 horas de secagem) de modo a não aumentar a duração de cada ciclo e permitir a realização de um maior número de ciclos. A concentração da solução salina também é igual à utilizada nos ensaios cíclicos.

A temperatura de funcionamento da câmara de nevoeiro salino neste ensaio composto foi de 50 °C, um aumento face aos 35 °C utilizados nos ensaios anteriores. Nestas condições foi possível promover uma maior secagem dos provetes durante as mesmas 16 horas de secagem durante os ciclos. Como se verificou nos ensaios preliminares a secagem de provetes que contêm sal é mais demorada e difícil do que a dos provetes sem sal. Pretendeu-se averiguar se a maior secagem dos provetes durante os ciclos promoveria o aumento da sua degradação. Este aumento da temperatura de secagem também teve em conta que as coberturas podem atingir em serviço temperaturas elevadas.

Tendo em conta que se verificou nos ensaios cíclicos que a partir de um certo número de ciclos o nível de degradação observado aparentemente não evoluía, foram introduzidos períodos de secagem de duração alargada entre os ciclos de nevoeiro salino/secagem. Pretendeu-se averiguar se a degradação tornava a aumentar nos ciclos subsequentes à secagem prolongada. Estes períodos de secagem prolongados também tiveram em conta que os dias de nevoeiro também são intercalados por largos períodos de tempo seco.

Foi incluída a operação de pincelagem a seco. Com esta operação promoveu-se a queda de material decorrente da degradação que já se encontrava solto ou praticamente solto. Pretendeu-se assim obter um efeito similar ao provocado pelo vento em telhas em exposição natural. A queda de material solto dos provetes permitiu expor aos ciclos subsequentes uma maior área de superfície degradada. Nos provetes que foram perdendo material durante os ciclos, a perda de massa devida à pincelagem é apenas uma parte da perda total de massa dos provetes devida ao ensaio.

Também foram incluídas neste ensaio composto as operações de aspersão das superfícies dos provetes seguida da sua pincelagem com pincel húmido. Procedeu-se assim à lavagem das superfícies, retirando o material decorrente da degradação que se verificou estar fixado aos provetes por cristais de sal. Pretendeu-se obter um efeito similar ao provocado nos telhados pela chuva e pelo vento. Com estas operações também se tentou dissolver e remover as camadas de sal cristalizado que alguns provetes apresentavam.

O período de secagem a seguir à aspersão dos provetes teve uma duração ainda maior do que a dos períodos de secagem entre ciclos anteriores, para tentar que os provetes atingissem o estado de secos a 50 °C, ficando assim todos no mesmo estado de secagem no início dos ciclos seguintes. A humedificação dos provetes decorrente da aspersão e pincelagem foi diferente porque em três dos doze provetes foi necessário proceder por duas vezes a estas operações. Também terá sido diferente a quantidade de água absorvida pelos provetes na sequência destas operações porque era diferente a quantidade de resíduos e de camadas de sal presente à superfície dos provetes.

O ensaio composto foi constituído por quatro fases com as seguintes constituição e sequência de operações:

Fase 1

- 13 ciclos de 24 horas em câmara de nevoeiro salino a 50 °C
(8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem)
- 10 dias de secagem dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C

Fase 2

- 10 ciclos de 24 horas em câmara de nevoeiro salino a 50 °C
(8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem)
- Pincelagem a seco 1
- 11 dias de secagem dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C

Fase 3

- 11 ciclos de 24 horas em câmara de nevoeiro salino a 50 °C
(8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem)
- Pincelagem a seco 2
- Aspersão com água desmineralizada e pincelagem com pincel húmido
- 20 dias de secagem dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C

Fase 4

- 15 ciclos de 24 horas em câmara de nevoeiro salino a 50 °C
(8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem)
- 44 dias de secagem dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C
- Pincelagem a seco 3
- 30 dias de secagem dos provetes em estufa não ventilada à temperatura de 60 °C

A capacidade da câmara de nevoeiro salino é de 12 provetes do tipo dos utilizados neste estudo. Foi assim decidido ensaiar em simultâneo dois provetes de cada um dos seis tipos de provetes não hidrofugados, submetendo assim todos os provetes exactamente às mesmas condições de ensaio.

Nos ensaios cíclicos anteriores já foi obtida informação acerca do comportamento de provetes hidrofugados sujeitos a ciclos de nevoeiro salino/secagem.

No Quadro 60 identificam-se os provetes submetidos ao ensaio composto e na Figura 115 a sua disposição na câmara climática de nevoeiro salino.

Quadro 60 - Provetes sujeitos ao ensaio composto

Fabricante	Tipo de provetes	Provetes	
1	Vermelhos não hidrofugados	F1 NH 5 D	F1 NH 9 D
	Branco não hidrofugados	F1 B 6 D	F1 B 17 D
2	Vermelhos não hidrofugados modelo 1	F2 NH 4 B	F2 NH 5 B
	Branco não hidrofugados modelo 1	F2 B 10 B	F2 B 11 B
	Vermelhos não hidrofugados modelo 2	F2 T2 NH 10 B	F2 T2 NH 11 B
	Vermelhos não hidrofugados modelo 3	F2 T3 NH 3 B	F2 T3 NH 4 B



Figura 115 - Provetes submetidos ao ensaio composto

5.4.5.2 Fase 1 - 13 ciclos seguidos de 10 dias de secagem

Na Figura 116 apresenta-se o estado dos provetes do fabricante 1 após 13 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem da fase 1 do ensaio e na Figura 117 o estado dos provetes do fabricante 2.



Figura 116 - Provetes do fabricante 1 após 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1

No Quadro 61 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada a todos os provetes nos ciclos da fase 1, com a indicação dos tipos de degradação observada, do ciclo em que se detectou o início da degradação e com a comparação com a degradação observada no ensaio cíclico. Também se apresentam os tipos de degradação observados nos provetes durante os 30 ciclos do ensaio cíclico.

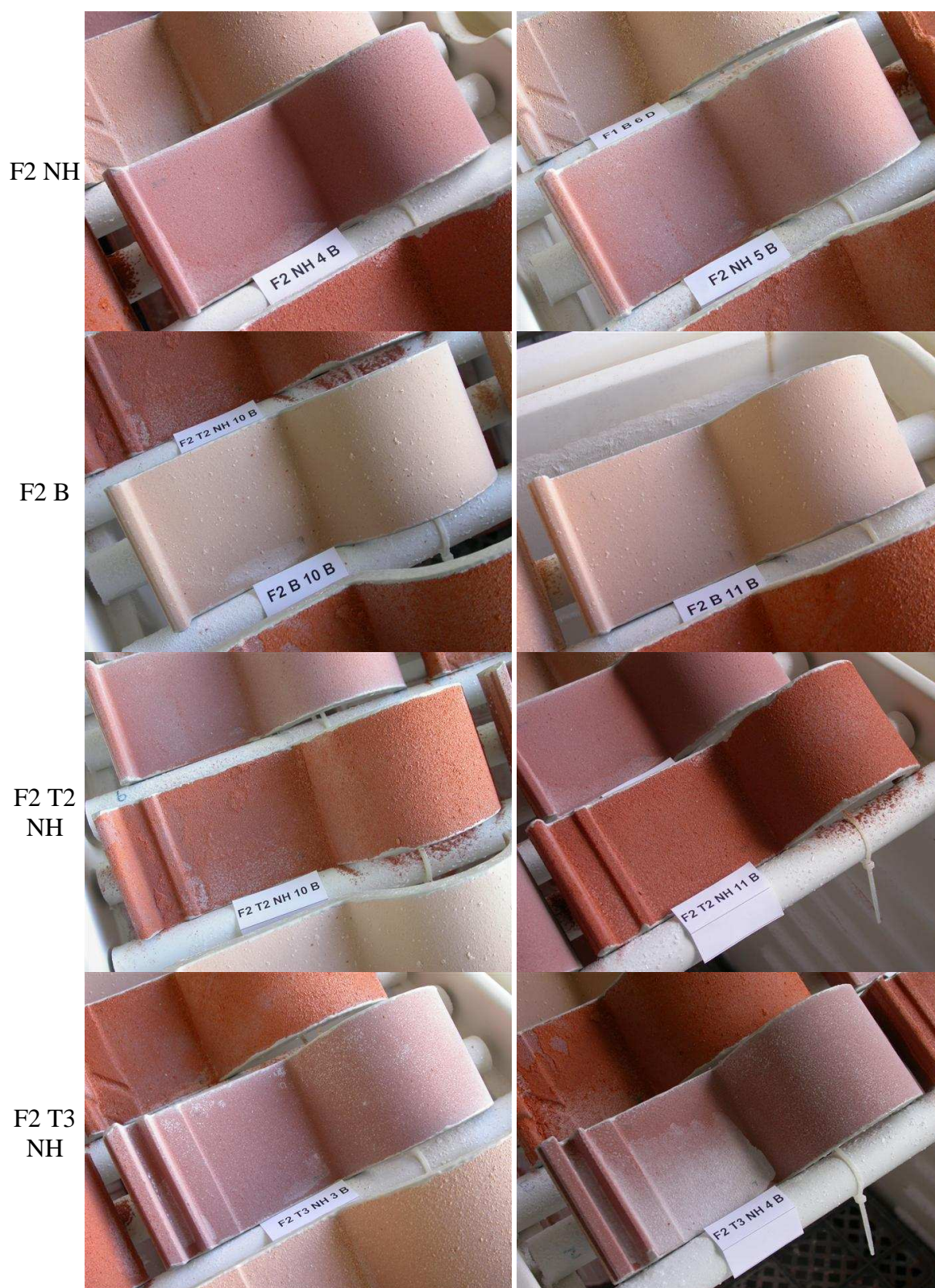


Figura 117 - Provetes do fabricante 2 após 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1

Quadro 61 - Inspeção visual nos 13 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 1

Tipo de pro-vetes	Após 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto				Degradação no ensaio cíclico
	Tipos de degradação	Degradação relativa	Início da degradação no ciclo	Comparação com degradação no ensaio cíclico	
F1 NH	Picamento	Mais degradados, em conjunto com F2 T2 NH	3	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
	Desagregação granular				Desagregação granular
	Escamação				
F1 B	Picamento	Degradação intermédia, superior à de F2 B	2	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
	Desagregação granular				Desagregação granular
	Escamação				Escamação
F2 NH	Picamento	Menos degradados, em conjunto com F2 T3 NH	-	Um pouco superior à do ciclo 10 e inferior à do ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
	Início da desagregação granular				Desagregação granular
F2 B	Picamento	Degradação intermédia, inferior à de F1 B	3-4	Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
	Desagregação granular em menor grau do que em F1 B				Desagregação granular
					Escamação
F2 T2 NH	Picamento	Mais degradados, em conjunto com F1 NH	1-2	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
	Desagregação granular				Desagregação granular
	Escamação				Escamação
F2 T3 NH	Picamento	Menos degradados, em conjunto com F2 NH	-	Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Picamento
					Desagregação granular
					Escamação

A sequência por tipos de provetes dos mais degradados para os menos degradados ao fim dos 13 ciclos da fase 1 do ensaio é a seguinte:

- Tipos de provetes mais degradados: F1 NH, F2 T2 NH
- Provetes com degradação intermédia: F1 B, F2 B
- Tipos de provetes menos degradados: F2 NH, F2 T3 NH

Na comparação com a degradação observada no ensaio cíclico os provetes dos tipos F1 NH, F1 B e F2 T2 NH apresentam maior degradação ao fim de 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto do que apresentaram ao fim dos 30 ciclos do ensaio cíclico. Os provetes do tipo F2 NH têm degradação um pouco superior à do ciclo 10 e inferior à do ciclo 30 do ensaio cíclico e os provetes dos tipos F2 B e F2 T3 NH apresentam degradação inferior à do ciclo 10 do ensaio cíclico.

Em 4 dos 6 tipos de provetes a degradação ao fim de 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto foi superior à degradação ao fim de 10 ciclos do ensaio cíclico. Em 3 destes 4 tipos de provetes a degradação foi mesmo superior à observada ao fim de 30 ciclos do ensaio cíclico.

A temperatura de funcionamento da câmara de nevoeiro salino é o único parâmetro de ensaio dos ciclos de nevoeiro salino/secagem que é diferente nesta primeira fase do ensaio composto em relação aos ensaios cíclicos. A temperatura foi aumentada de 35 °C para 50 °C, o que promoveu uma maior secagem dos provetes durante as mesmas 16 horas de secagem de cada ciclo. A diferença de comportamento da maior parte dos provetes neste ensaio composto parece assim justificar a validade desta opção.

Nos últimos ciclos desta fase 1 a degradação visível dos provetes praticamente não evoluiu, foi então decidido interromper os ciclos e passar à operação seguinte desta fase.

Os provetes foram mantidos na câmara à temperatura de 50 °C sendo sujeitos a secagem contínua e prolongada durante 10 dias, com os objectivos de impor a diminuição do nível de humedecimento dos provetes e averiguar se nos ciclos de nevoeiro salino/secagem subsequentes a degradação tornava a evoluir.

Durante a secagem os provetes foram pesados várias vezes tendo-se obtido o gráfico da Figura 118 com a variação de massa em relação à massa seca dos provetes e o Quadro 62, onde também se apresenta a absorção de água por imersão em água fria de provetes provenientes das mesmas telhas de onde foram extraídos os provetes sujeitos a este ensaio composto e uma classificação da degradação observada.

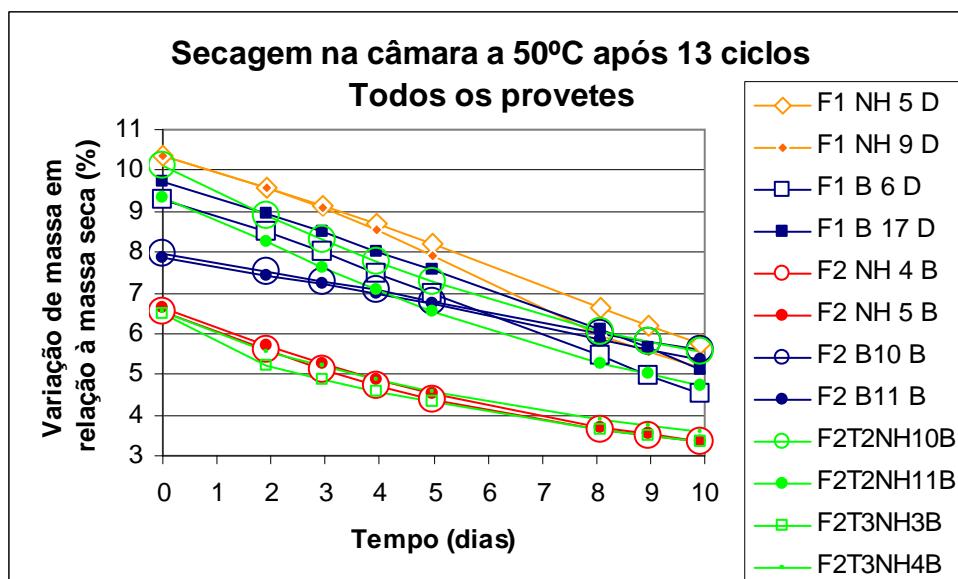


Figura 118 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 10 dias da fase 1

Quadro 62 - Secagem durante 10 dias na fase 1

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Degradação após 13 ciclos de nev./sec.	Variação de massa em relação à massa seca [%]		
			Dias de secagem		
			0	9	10
F1 NH 5 D	9,2	+++	10,4	6,2	5,7
F1 NH 9 D	9,2		10,4	5,5	5,2
F1 B 6 D	9,1	++	9,3	5,0	4,5
F1 B 17 D	9,2		9,7	5,6	5,1
F2 NH 4 B	5,9	-	6,5	3,5	3,3
F2 NH 5 B	5,9		6,6	3,5	3,4
F2 B 10 B	6,8	+	7,9	5,8	5,6
F2 B 11 B	6,8		7,9	5,6	5,4
F2 T2 NH 10 B	8,2	+++	10,1	5,8	5,5
F2 T2 NH 11 B	8,2		9,3	5,0	4,7
F2 T3 NH 3 B	5,7	-	6,5	3,5	3,4
F2 T3 NH 4 B	5,7		6,5	3,7	3,6

No fim dos ciclos de nevoeiro salino/secagem desta fase 1 todos os provetes já tinham uma variação de massa em relação à sua massa seca superior à absorção de água. A secagem permitiu inverter esta situação.

Os 10 dias de secagem não foram suficientes para a massa dos provetes estabilizar e portanto os provetes não atingiram o estado de secos a 50 °C. No entanto a massa dos provetes F2 NH e F2 T3 NH, que são os provetes menos degradados, já começa a mostrar uma tendência para estabilizar.

Na Figura 119 apresentam-se os provetes do fabricante 1 após 10 dias de secagem da fase 1 do ensaio e na Figura 120 os provetes do fabricante 2. Observa-se o aumento da presença de sal cristalizado à superfície dos provetes.



Figura 119 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 1

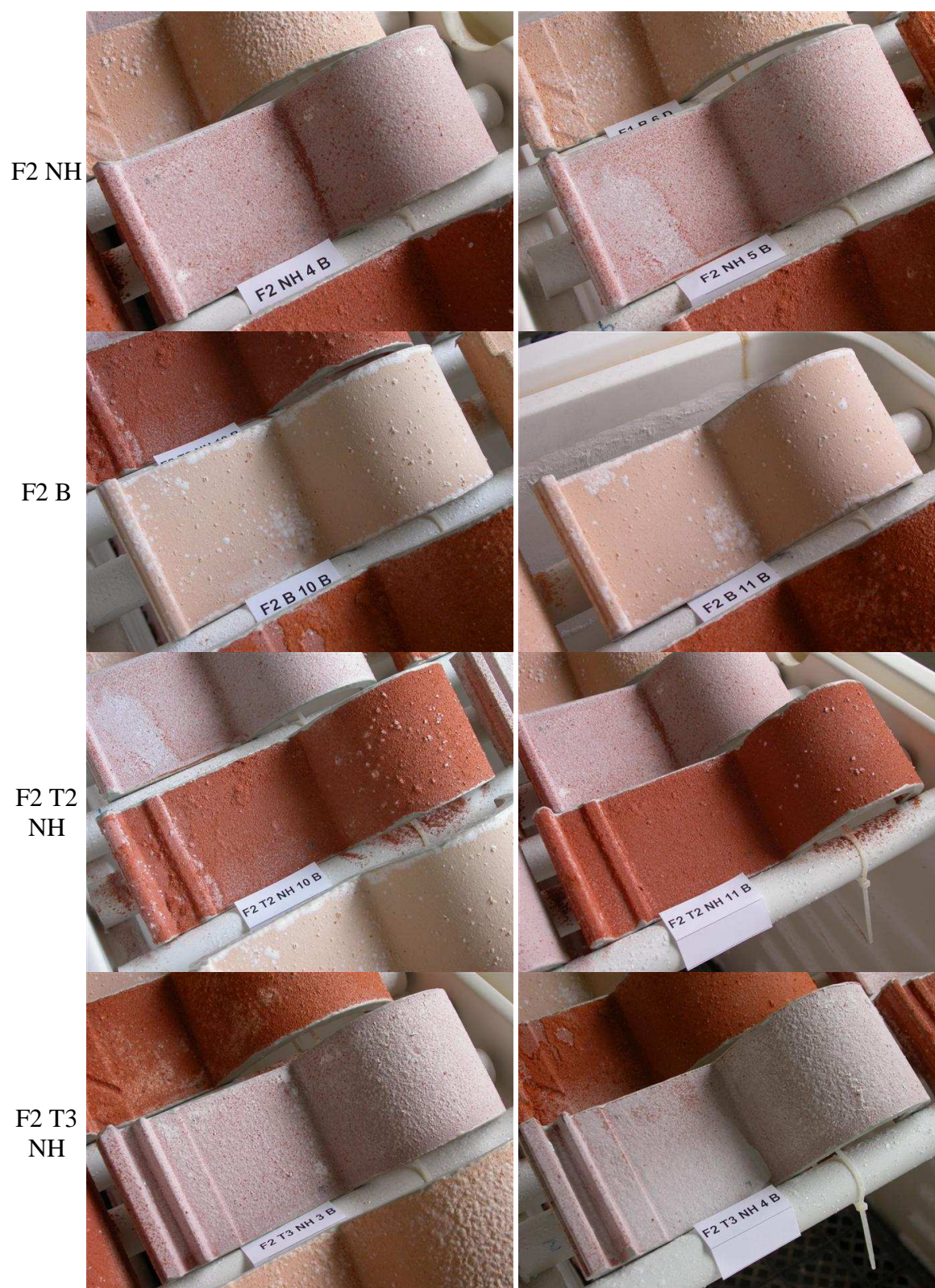


Figura 120 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 1

5.4.5.3 Fase 2 - 10 ciclos, pincelagem a seco e 11 dias de secagem

Na Figura 121 apresenta-se o estado dos provetes do fabricante 1 após 10 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem da fase 2 do ensaio e na Figura 122 o estado dos provetes do fabricante 2.



Figura 121 - Provetes do fabricante 1 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2

No Quadro 63 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada a todos os provetes após 10 ciclos da fase 2, com a indicação dos tipos de degradação observada e com a comparação com a degradação observada no ensaio cíclico. Também se apresentam os resultados da inspeção visual da fase anterior deste ensaio composto e os tipos de degradação observados nos provetes durante os 30 ciclos do ensaio cíclico.

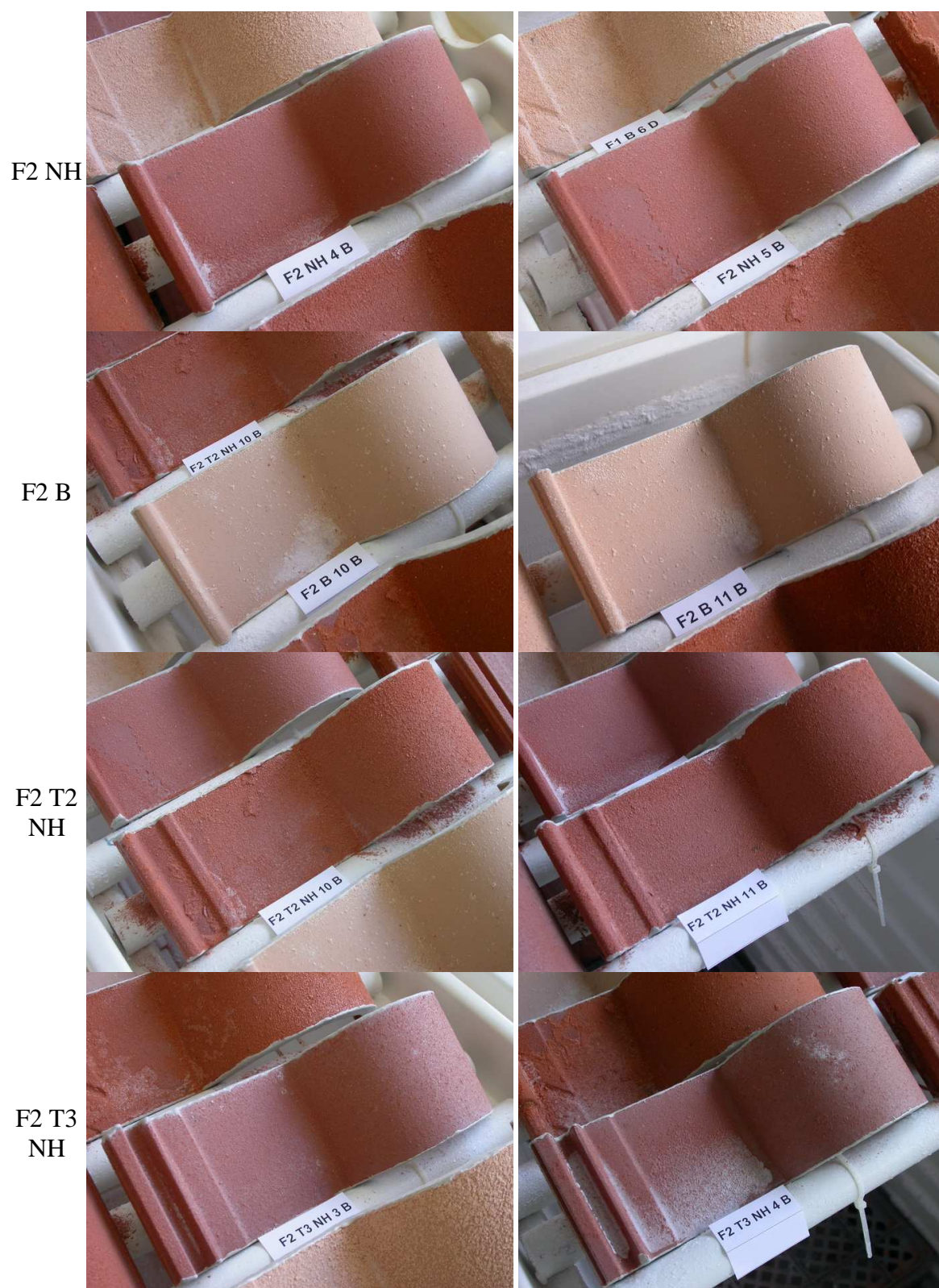


Figura 122 - Provetes do fabricante 2 após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2

Quadro 63 - Inspeção visual após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2

Tipo de prove-tes	Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto		Após 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto		Degradação no ensaio cíclico
	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	
F1 NH	Picamento	+++	Picamento	+++	Picamento
	Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação		Escamação		
F1 B	Picamento	+++	Picamento	++	Picamento
	Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação		Escamação		Escamação
F2 NH	Picamento	++	Picamento	-	Picamento
	Desagregação granular	Maior degradação do que no ciclo 30 do ensaio cíclico	Início da desagregação granular	Um pouco superior à do ciclo 10 e inferior à do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação				
F2 B	Picamento	-	Picamento	+	Picamento
	Desagregação granular	Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular em menor grau do que em F1 B	Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação				Escamação
F2 T2 NH	Picamento	+++	Picamento	+++	Picamento
	Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação		Escamação		Escamação
F2 T3 NH	Picamento	+	Picamento	-	Picamento
	Desagregação granular	Maior degradação do que ciclo 30 do ensaio cíclico		Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação				Escamação

No fim dos 13 ciclos da fase 1 os provetes mais degradados eram os dos tipos F1 NH e F2 T2 NH. Nestes 10 ciclos da fase 2 a degradação dos provetes F1 NH evoluiu pouco e a dos provetes F2 T2 NH também, mas mais do que a dos F1 NH.

Os provetes cuja evolução da degradação foi maior nos ciclos desta fase 2 foram os do tipo F1 B, que passaram a ser os mais degradados.

No fim dos ciclos da fase 1 os provetes menos degradados eram os dos tipos F2 NH e F2 T3 NH. Nos ciclos desta fase 2 a sua degradação evoluiu, é mais homogénea e mais densa. A degradação em F2 NH é mais densa do que em F2 T3 NH. As escamas destes dois tipos de provetes têm menor dimensão do que as escamas dos provetes F1 NH, F2 T2 NH e F1 B.

A degradação dos provetes F2 B evoluiu muito pouco, menos do que a dos provetes F2 NH e F2 T3 NH. No fim dos ciclos da fase 2 os provetes F2 B passaram a ser os menos degradados, apresentando uma degradação menos densa do que todos os outros provetes.

No fim desta fase 2 todos os provete apresentavam degradação superior à degradação provocada pelos 30 ciclos do ensaio cíclico, com excepção dos provetes F2 B, cuja degradação era mesmo inferior à observada na maioria dos provetes do mesmo tipo depois de sujeitos a 10 ciclos no ensaio cíclico.

A sequência por tipos de provetes dos mais degradados para os menos degradados ao fim dos 10 ciclos da fase 2 do ensaio é a seguinte:

- Tipos de provetes mais degradados: F1 B, F2 T2 NH, F1 NH
- Provetes com degradação intermédia: F2 NH, F2 T3 NH
- Tipos de provetes menos degradados: F2 B

No fim dos ciclos da fase 1 a evolução da degradação da generalidade dos provetes tinha aparentemente cessado. Com a introdução de um período prolongado de secagem entre ciclos é possível fazer com que a degradação torne a evoluir, como se verificou na maior parte dos provetes nos ciclos desta fase 2.

Após os ciclos de nevoeiro salino/secagem os provetes foram passados com um pincel seco. No Quadro 64 apresentam-se os valores da massa perdida e os tipos de resíduos obtidos.

Quadro 64 - Pincelagem a seco 1, após 10 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 2

Provetes	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F1 NH 5 D	2,33	0,27	Pó Escamas Sal Escamas compridas Resina	Zonas das duas faces com camada de sal espessa e dura.
F1 NH 9 D	2,69	0,31	Pó Escamas pequenas Alguns fragmentos Alguma resina	
F1 B 6 D	4,57	0,58	Pó Escamas Sal	Zonas das duas faces com camada de sal espessa e dura. Escamas fixadas às camadas de sal.
F1 B 17 D	3,96	0,51		
F2 NH 4 B	1,34	0,18	Pó fino Escamas Várias escamas compridas	
F2 NH 5 B	1,26	0,17	Pó fino Escamas	
F2 B 10 B	0,55	0,08	Pó Escamas Algumas escamas compridas	
F2 B 11 B	0,53	0,08	Pó Escamas	
F2 T2 NH 10 B	5,01	0,68	Pó Escamas Sal Escamas maiores do tardo - plaquetas	Zona com camada de sal espessa e dura nas duas faces. Tardo muito degradado, com escamas grandes que chegam a ser plaquetas. Escamas e plaquetas fixadas às camadas de sal.
F2 T2 NH 11 B	4,98	0,67		
F2 T3 NH 3 B	1,24	0,16	Pó Escamas	
F2 T3 NH 4 B	0,83	0,11	Pó Escamas Alguma resina	

O pincel removeu material na forma de cristais de sal e material cerâmico nas formas de pó, escamas, plaquetas e outros fragmentos. De alguns provetes também se destacaram pequenos fragmentos de resina.

O gráfico da Figura 123 apresenta a massa perdida pelos provetes na pincelagem a seco 1 em relação à massa seca inicial dos provetes.

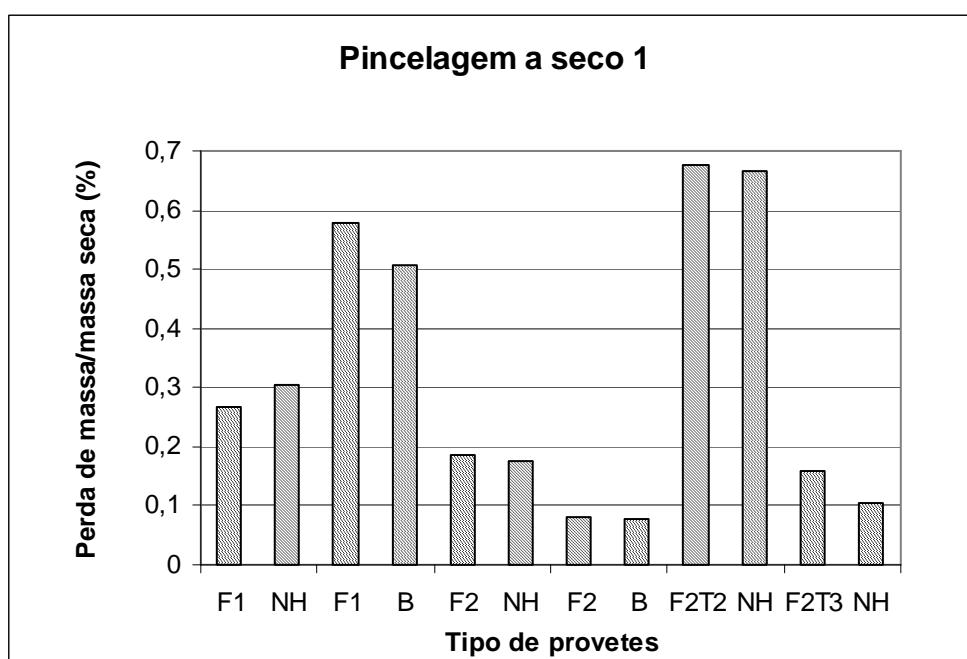


Figura 123 - Perda de massa na pincelagem a seco 1 em relação à massa seca

Com a pincelagem a seco pretendeu-se obter um efeito similar ao do vento. A pincelagem promoveu a queda de material que se encontrava solto ou praticamente solto. Nos provetes que foram perdendo massa durante os ciclos, a perda de massa devida à pincelagem é apenas uma parte da perda total de massa dos provetes devida ao ensaio.

A massa perdida pelos provetes devido à pincelagem tem valores muito baixos em relação à massa seca inicial dos provetes, variando entre menos de 0,1 % e cerca de 0,7 %.

A sequência dos tipos de provetes por ordem decrescente de perda de massa é a seguinte:

F2 T2 NH - F1 B - F1 NH - F2 NH - F2 T3 NH - F2 B

A sequência dos provetes mais degradados para os menos degradados é a seguinte:

F1 B - F1 NH - F2 T2 NH - F2 NH - F2 T3 NH - F2 B

Como era expectável foi dos provetes mais degradados que saiu mais material.

Algum material resultante da degradação ficou ainda aderente aos provetes, mesmo após a pincelagem a seco. Algum deste material estava fixado por cristais de sal. Em alguns dos provetes esse material estava fixado em camadas grossas de sal duro, camadas que se foram formando pela acumulação de cristais de sal ao longo dos ciclos.

A Figura 124 apresenta os provetes do fabricante 1 após pincelagem e a Figura 125 os provetes do fabricante 2.



Figura 124 - Provetes do fabricante 1 após pincelagem da fase 2

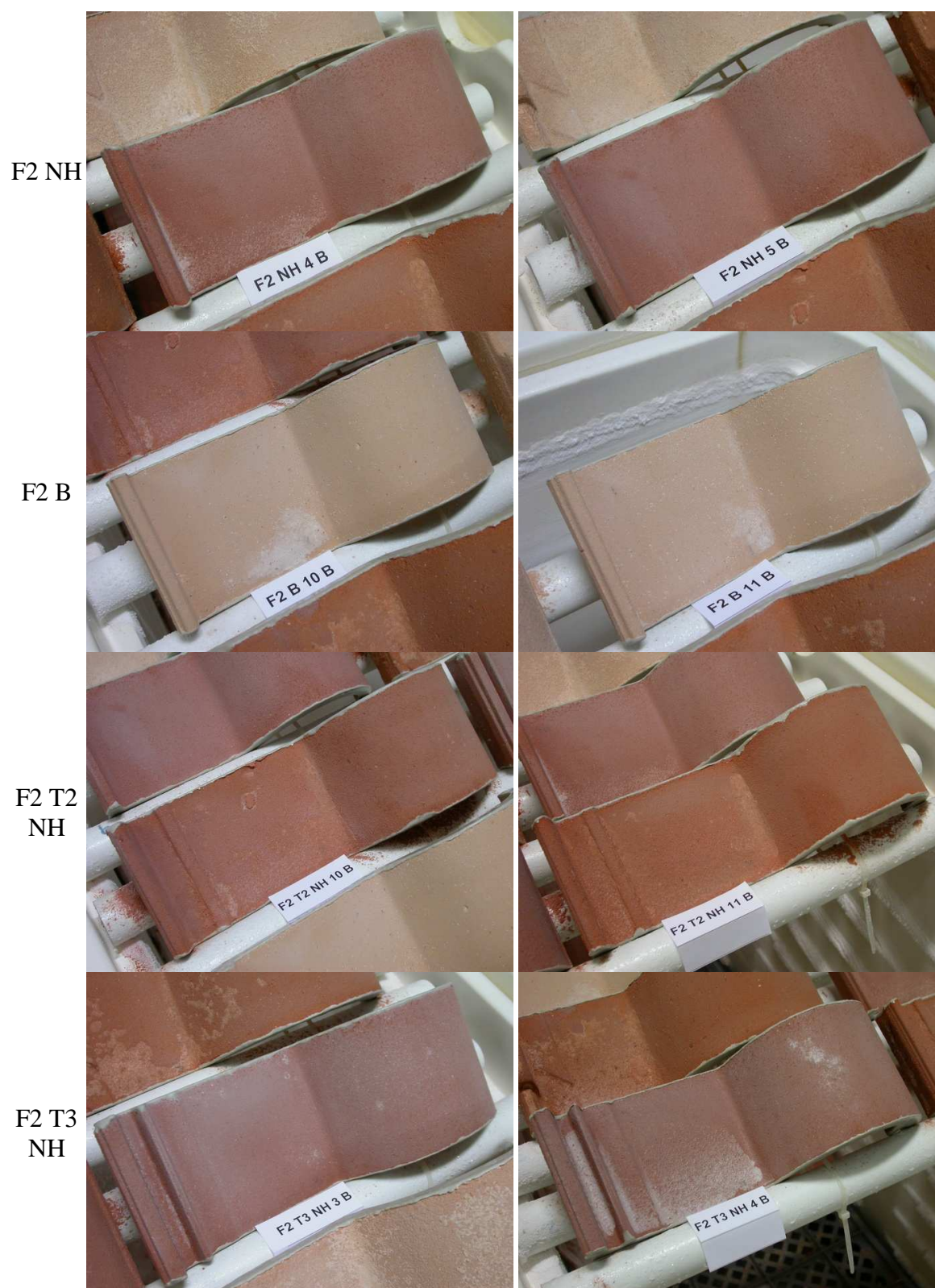


Figura 125 - Provetes do fabricante 2 após pincelagem da fase 2

Após os ciclos e pincelagem da fase 2 do ensaio composto os provetes foram sujeitos a secagem prolongada dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C durante 11 dias, período de tempo idêntico à secagem prolongada da fase 1, que durou 10 dias. Durante a secagem desta fase 2 os provetes foram pesados apenas no início e nos três últimos dias.

No Quadro 65 apresentam-se os resultados obtidos e também a absorção de água por imersão em água fria de provetes provenientes das mesmas telhas de onde foram extraídos os provetes sujeitos a este ensaio composto.

Quadro 65 - Secagem durante 11 dias na fase 2

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Variação de massa em relação à massa seca [%]		
		Dias de secagem		
		0	10	11
F1 NH 5 D	9,2	11,0	8,2	7,9
F1 NH 9 D	9,2	11,1	7,5	7,2
F1 B 6 D	9,1	9,7	5,9	5,6
F1 B 17 D	9,2	10,1	6,8	6,5
F2 NH 4 B	5,9	6,4	3,4	3,2
F2 NH 5 B	5,9	6,5	3,5	3,3
F2 B 10 B	6,8	7,9	5,7	5,5
F2 B 11 B	6,8	7,8	5,3	5,0
F2 T2 NH 10 B	8,2	10,5	7,4	7,2
F2 T2 NH 11 B	8,2	9,0	5,6	5,3
F2 T3 NH 3 B	5,7	6,4	3,0	2,9
F2 T3 NH 4 B	5,7	6,4	3,3	3,1

Tal como na fase 1, no fim dos ciclos de nevoeiro salino/secagem da fase 2 todos os provetes já tinham uma variação de massa em relação à sua massa seca superior à absorção de água. Isto acontece mesmo após a perda de massa decorrente da pincelagem. A secagem permitiu inverter esta situação.

Os gráficos seguintes permitem comparar os efeitos dos períodos prolongados de secagem da fase 1 e da fase 2 do ensaio composto sobre a massa dos provetes, agrupados em provetes mais degradados e em provetes menos degradados.

Tal como na fase 1, a secagem prolongada da fase 2 não foi suficiente para a massa dos provetes estabilizar e portanto os provetes não atingiram o estado de secos a 50 °C.

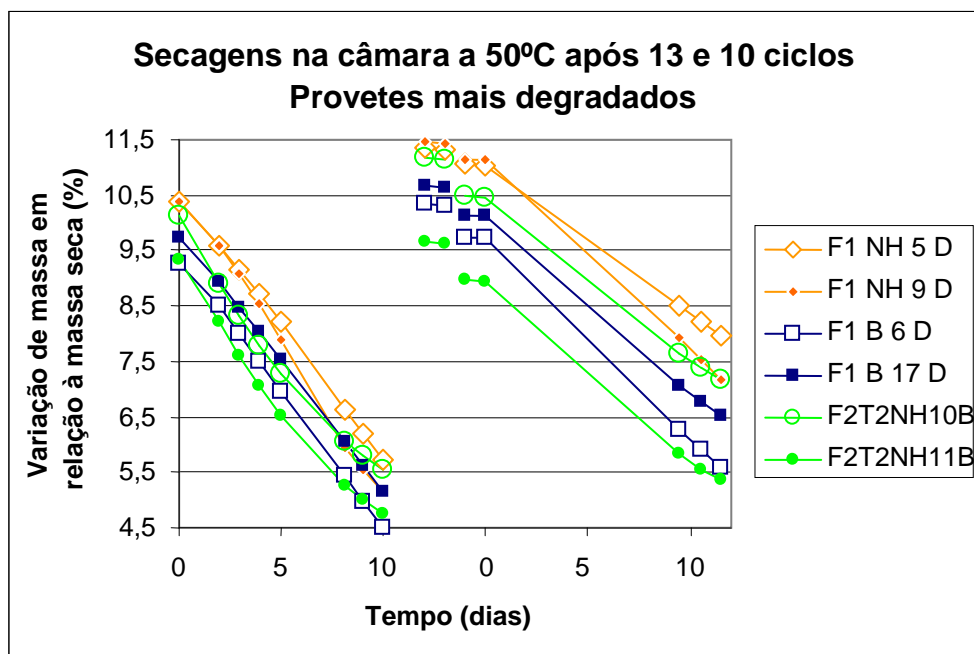


Figura 126 - Variação de massa dos provetes mais degradados da fase 2 durante as secagens da fase 1 e da fase 2

Os provetes mais degradados, apresentados na Figura 126, começaram a secagem da fase 2 com massa superior à que tinham no início da secagem da fase 1, com exceção do provete F2 T2 NH 11 B. Os provetes F2 T2 NH 11 B e F2 T2 NH 10 B foram os que perderam mais massa com a pincelagem a seco, o que é perceptível no gráfico.

Ao fim de 11 dias de secagem todos os provetes tinham massa superior à massa ao fim dos 10 dias de secagem da fase 1.

Os provetes menos degradados, apresentados na Figura 127, começaram a secagem da fase 2 com massa idêntica à que tinham no início da secagem da fase 1.

Ao fim de 10 dias de secagem da fase 2 os provetes tinham uma massa idêntica à do fim dos 10 dias de secagem da fase 1 do ensaio, com exceção dos provetes F2 T3 NH, cuja massa é ligeiramente inferior.

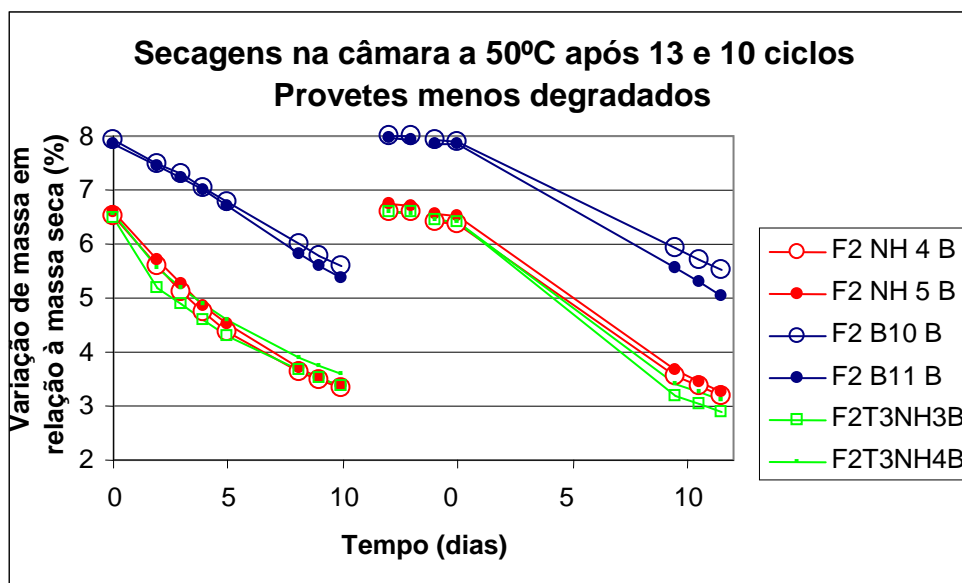


Figura 127 - Variação de massa dos provetes menos degradados da fase 2 durante as secagens da fase 1 e da fase 2

Na Figura 128 apresentam-se os provetes do fabricante 1 após 11 dias de secagem da fase 2 do ensaio e na Figura 129 os provetes do fabricante 2.



Figura 128 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 2

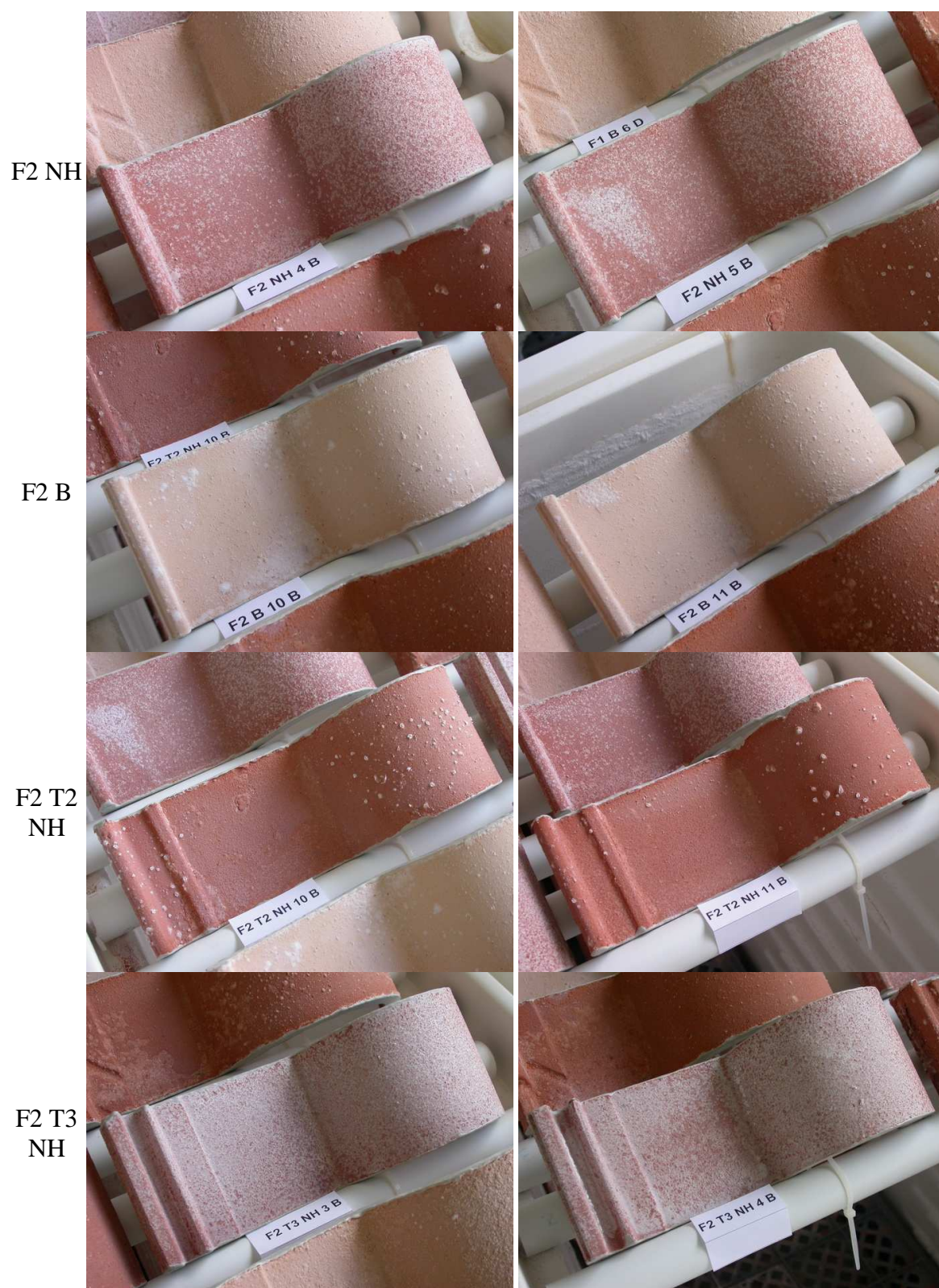


Figura 129 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 2

Tal como aconteceu na secagem prolongada da fase 1, também se observa o aumento da presença de sal cristalizado à superfície dos provetes, que é mais visível no caso dos provetes F2 NH e F2 T3 NH.

Comparando a superfície dos provetes após pincelagem e após a secagem verifica-se que, aparentemente, a secagem promoveu o aparecimento de degradação no caso dos provetes dos tipos F1 NH, F1 B e F2 B.

Após 2 fases de ensaio em que os provetes foram sujeitos, na primeira fase, a ciclos de nevoeiro salino/secagem e a secagem prolongada, e na segunda fase a ciclos de nevoeiro salino/secagem, à pincelagem a seco das suas superfícies e a secagem prolongada, os provetes enfrentam a fase 3 do ensaio, que começa com ciclos de nevoeiro salino, com a sua superfície no estado indicado no quadro seguinte.

Quadro 66 - Estado da superfície dos provetes no fim da fase 2 do ensaio composto

Tipo de provetes	Estado da face superior
F1 NH	Camada de sal contínua em parte da aba, algum material aderente
F1 B	Camada de sal contínua em parte da aba, escamas aderentes
F2 NH	Algum material aderente
F2 B	Como tiveram pouca degradação há pouco material aderente
F2 T2 NH	Algum material aderente
F2 T3 NH	Pouca degradação, algum material aderente

5.4.5.4 Fase 3 - 11 ciclos, pincelagem a seco, molhagem e 20 dias de secagem

Na Figura 130 apresenta-se o estado dos provetes do fabricante 1 após 11 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem da fase 3 do ensaio e na Figura 131 o estado dos provetes do fabricante 2.



Figura 130 - Provetes do fabricante 1 após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3

No Quadro 67 apresenta-se o resumo da inspeção visual realizada a todos os provetes após 11 ciclos da fase 3, com a indicação dos tipos de degradação observada. Também se apresentam os resultados da inspeção visual das duas fases anteriores deste ensaio composto e os tipos de degradação observados nos provetes durante os 30 ciclos do ensaio cíclico.

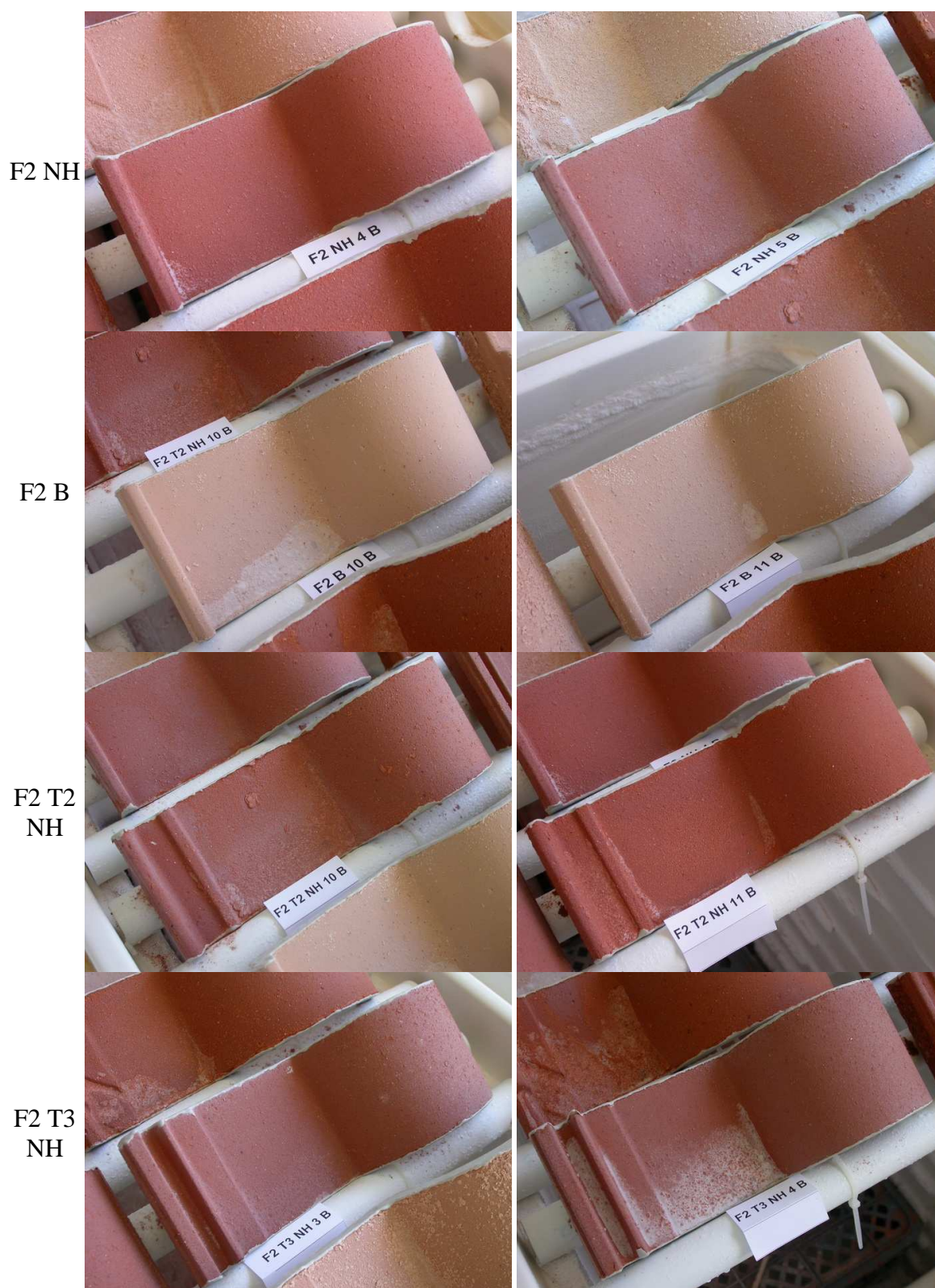


Figura 131 - Provêtes do fabricante 2 após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3

Quadro 67 - Inspeção visual após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3

Tipo de prove-tes	Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto		Após 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto		Degradação no ensaio cíclico
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	
F1 NH	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre em arestas da junta da aba.	Picamento	+++	Picamento	+++	Picamento Desagregação granular
	Desagregação granular		Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	
	Pouca escamação		Escamação		Escamação		
	Fissuras/ Fracturas/ Lascagem						
F1 B	Picamento	Degradação de âmbito generalizado. São os provetes mais degradados. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre em arestas da face exterior da junta da aba e da junta do canudo.	Picamento	+++	Picamento	++	Picamento Desagregação granular Escamação
	Desagregação granular		Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	
	Escamação		Escamação		Escamação		
	Fissuras/ Fracturas/ Lascagem						

Quadro 67 - Inspeção visual após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3 (cont.)

Tipo de provetes	Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto		Após 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto		Degradação no ensaio cíclico
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	
F2 NH	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre num provete, na aresta da junta da aba e na face inferior, no vinco do molde.	Picamento	++	Picamento	-	Picamento Desagregação granular
	Desagregação granular		Maior degradação do que no ciclo 30 do ensaio cíclico	Início da desagregação granular	Um pouco superior à do ciclo 10 e inferior à do ciclo 30 do ensaio cíclico		
	Escamação						
	Fissuras/ Fracturas/ Lascagem						
F2 B	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre na aresta inferior da junta da aba dos dois provetes.	Picamento	-	Picamento	+	Picamento Desagregação granular Escamação
	Desagregação granular		Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular em menor grau do que em F1 B	Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico		
	Escamação						
	Fissuras/ Fracturas/ Lascagem						

Quadro 67 - Inspeção visual após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3 (cont.)

Tipo de provetes	Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto		Após 13 ciclos da fase 1 do ensaio composto		Degradação no ensaio cíclico
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico	
F2 T2 NH	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre nas arestas da junta do canudo dos dois provetes.	Picamento	+++	Picamento	+++	Picamento
	Desagregação granular		Desagregação granular		Desagregação granular	Maior do que no ciclo 10 e no ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação		Escamação		Escamação		Escamação
	Fissuras/ Fracturas/ Lascagem						
F2 T3 NH	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo.	Picamento	+	Picamento	-	Picamento
	Desagregação granular		Desagregação granular	Maior degradação do que ciclo 30 do ensaio cíclico		Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico	Desagregação granular
	Escamação		Escamação				Escamação

A degradação nas formas de picamento, desagregação granular e escamação da face superior dos provetes resultante dos ciclos de nevoeiro salino/secagem desta fase 3 do ensaio atingiu um nível baixo na generalidade dos provetes.

No entanto assistiu-se ao aparecimento de novos tipos de degradação, que originam a queda de material de maiores dimensões e que podem ter consequências mais graves no desempenho das telhas.

Estes tipos de degradação mais graves são consequência de um processo iniciado com o aparecimento de fissuras. Com o decorrer dos ciclos as fissuras foram aumentando e originaram fracturas, que ocorreram quando se separaram fragmentos dos provetes. Os fragmentos tinham a forma de lascas.



Ciclo 6



Ciclo 7



Ciclo 9



Ciclo 11

Figura 132 - Evolução da degradação localizada do provete F2 B 10 B nos ciclos da fase 3

Na Figura 132 observa-se a evolução final da degradação localizada do provete F2 B 10 B, que deu origem à queda de uma lasca.

Este processo foi na maior parte dos casos iniciado com a formação de uma fissura numa dobra, vinco ou ruga da superfície dos provetes. A dobra, vinco ou ruga é uma descontinuidade na superfície das telhas devido à formação de um vinco no decurso da operação de prensagem.

Na Figura 133 apresenta-se a degradação localizada do provete F2 B 11 B, que se manifestou na forma de uma fissura extensa que dará origem a uma fractura e queda de lascas.

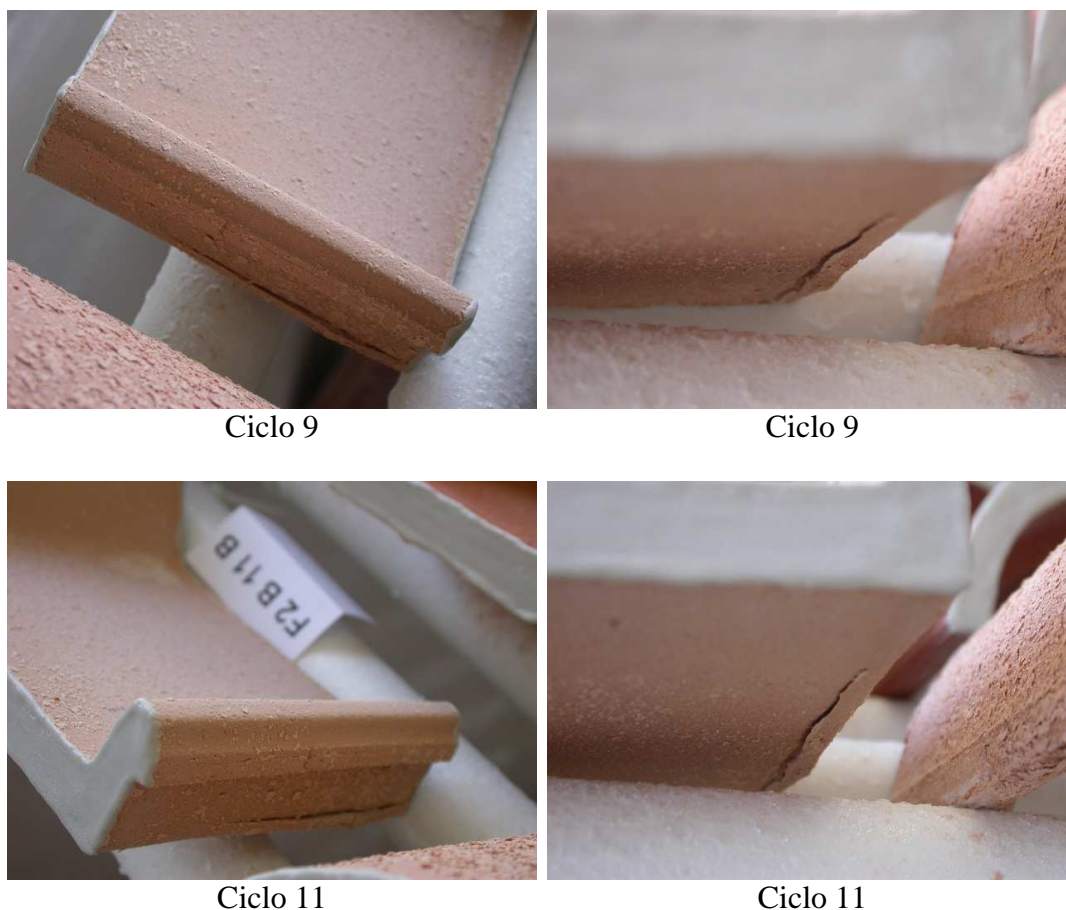


Figura 133 - Degradação localizada do provete F2 B 11 B nos ciclos da fase 3

Estes tipos de degradação mais graves não são apenas superficiais, podendo afectar toda a espessura das telhas e levar à queda de fragmentos que podem afectar a sua estanquidade em serviço.

A Figura 134 apresenta aspectos da degradação dos provetes F1 B 17 D e F2 T2 NH 10 B após os ciclos da fase 3, onde se podem observar diversas fissuras que irão dar origem a fracturas e queda de lascas.

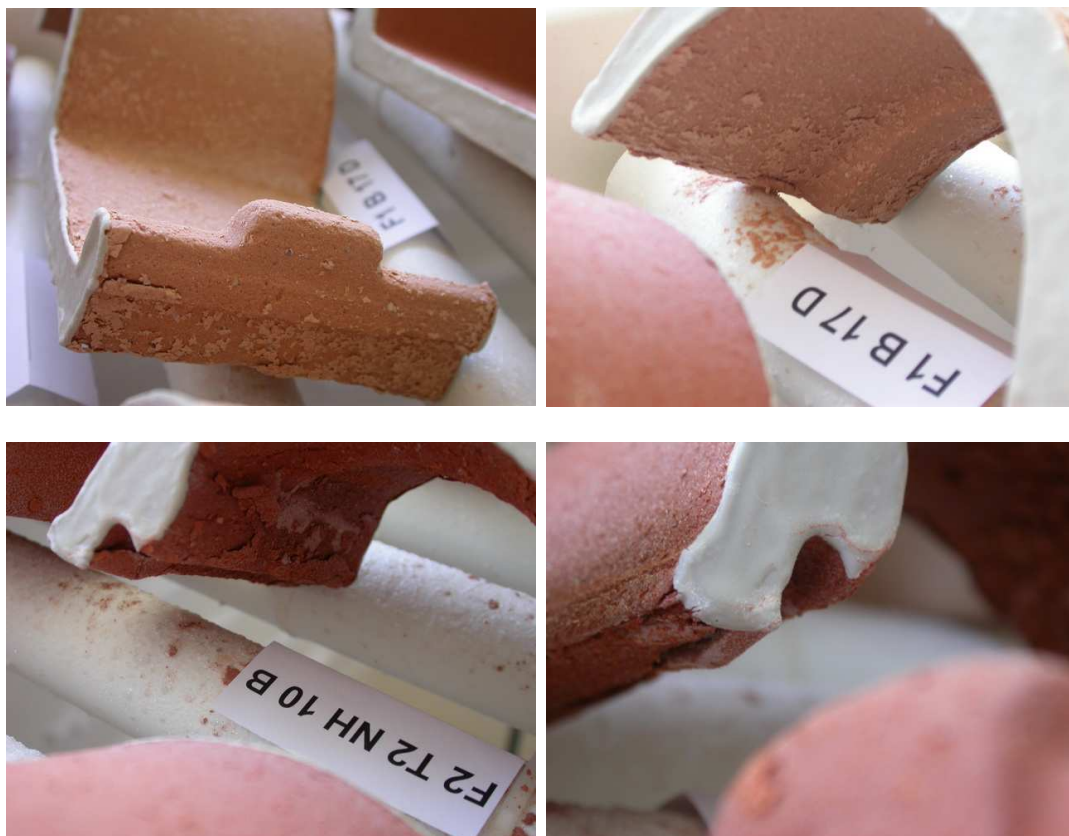


Figura 134 - Pormenores da degradação dos provetes F1 B 17 D e F2 T2 NH 10 B após ciclos da fase 3

Considerando apenas o âmbito e nível atingido dos tipos de degradação picamento, desagregação granular e escamação, a sequência por tipos de provetes dos mais degradados para os menos degradados ao fim dos 11 ciclos da fase 3 do ensaio é a seguinte:

F1 B - F2 NH - F2 T3 NH - F1 NH - F2 B - F2 T2 NH

Apenas os provetes do tipo F2 T3 NH não apresentam fissuras - fracturas - lascagem ao fim dos 11 ciclos da fase 3 do ensaio.

Durante os ciclos da fase 3 continuou a acumulação de sal à superfície de muitos provetes, que já se tinha detectado na fase anterior. Em consequência aumentou a extensão da camada de sal espessa e dura sobre a aba dos provetes afectados. No Quadro 68 apresenta-se a extensão aproximada da aba dos provetes coberta por essa camada de sal.

Quadro 68 - Camadas de sal acumuladas nas superfícies dos provetes

Tipo de provetes	Extensão da camada de sal sobre a aba
F1 NH	F1 NH 5 D - em 80 % da área da aba F1 NH 9 D - em 10 % da área da aba
F1 B	F1 B 6 D - em 100 % da área da aba F1 B 17 D - em 20 % da área da aba Material sobre essa camada: pó e escamas
F2 NH	Acumulação de sal com pequena extensão localizada na aresta aba - junta do provete F2 NH 4 B.
F2 B	F2 B 10 B - em 10 % da área da aba F2 B 11 B - extensão reduzida
F2 T2 NH	F2 T2 NH 10 B - em 30 % da área da aba F2 T2 NH 11 B - em 10 % da área da aba
F2 T3 NH	F2 T3 NH 3 B - insignificante F2 T3 NH 4 B - em 40 % da área da aba

Após os ciclos de nevoeiro salino/secagem os provetes foram passados com um pincel seco. No Quadro 69 apresentam-se os valores da massa perdida e os tipos de resíduos resultantes desta pincelagem a seco 2 (fase 3 do ensaio composto) e da pincelagem a seco 1 (fase 2 do ensaio composto).

Na pincelagem a seco 2, o pincel removeu material na forma de cristais de sal e material cerâmico nas formas de pó, escamas, plaquetas, lascas e outros fragmentos. De alguns provetes também se destacaram pequenos fragmentos de resina.

Quadro 69 - Pincelagem a seco 2, após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3

Pro- vete	2ª pincelagem a seco (fase3)				1ª pincelagem a seco (fase2)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F1 NH 5 D	0,92	0,11	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas) Resina	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.	2,33	0,27	Pó Escamas Sal Escamas compridas Resina	Zonas das duas faces com camada de sal espessa e dura.
F1 NH 9 D	1,01	0,11			2,69	0,31	Pó Escamas pequenas Alguns fragmentos Alguma resina	
F1 B 6 D	4,40	0,56	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas). Escamas grandes que tinham ficado aderentes às camadas de sal, da face superior e do tardoz, após a primeira pincelagem a seco. Com a pincelagem caíram algumas lascas provenientes das fissuras e fracturas.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados no tardoz e na face superior.	4,57	0,58	Pó Escamas Sal	Zonas das duas faces com camada de sal espessa e dura. Escamas fixadas às camadas de sal.
F1 B 17 D	3,40	0,44			3,96	0,51		

Quadro 69 - Pincelagem a seco 2, após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3 (cont.)

Pro- vete	2ª pincelagem a seco (fase3)				1ª pincelagem a seco (fase2)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F2 NH 4 B	0,44	0,06	Pó Escamas Sal 2 lascas, uma da aresta da junta da aba e outra da face inferior, na junta do molde.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.	1,34	0,18	Pó fino Escamas Várias escamas compridas	
F2 NH 5 B	0,44	0,06	Pó Escamas Sal		1,26	0,17	Pó fino Escamas	
F2 B 10 B	0,24	0,04	Pó Escamas Sal	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.	0,55	0,08	Pó Escamas Algumas escamas compridas	
F2 B 11 B	0,39	0,06			0,53	0,08	Pó Escamas	

Quadro 69 - Pincelagem a seco 2, após 11 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 3 (cont.)

Pro- vete	2ª pincelagem a seco (fase3)				1ª pincelagem a seco (fase2)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do proвете seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do proвете seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F2 T2 NH 10 B	1,92	0,26	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas). Escamas grandes ou plaquetas no tardez, que tinham ficado aderentes à camada de sal após a primeira pincelagem a seco.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície: escamas grandes ou plaquetas no tardoz e grãos ou pó na face superior.	5,01	0,68	Pó Escamas Sal Escamas maiores do tardez-plaquetas	Zona com camada de sal espessa e dura nas duas faces. Tardoz muito degradado, com escamas grandes que chegam a ser plaquetas. Escamas e plaquetas fixadas às camadas de sal.
F2 T2 NH 11 B	2,19	0,29	Com a pincelagem caíram algumas lascas provenientes das fissuras e fracturas nas arestas da junta do canudo.		4,98	0,67		
F2T3 NH 3 B	0,46	0,06	Pó Escamas Alguma resina	Após pincelagem ainda ficaram resíduos	1,24	0,16	Pó Escamas	
F2T3 NH 4 B	0,39	0,05	Pó Escamas Sal Resina	fixados à superfície.	0,83	0,11	Pó Escamas Alguma resina	

O gráfico da Figura 135 apresenta a massa perdida pelos provetes nas pincelagens a seco 1 e 2, em relação à massa seca inicial dos provetes.

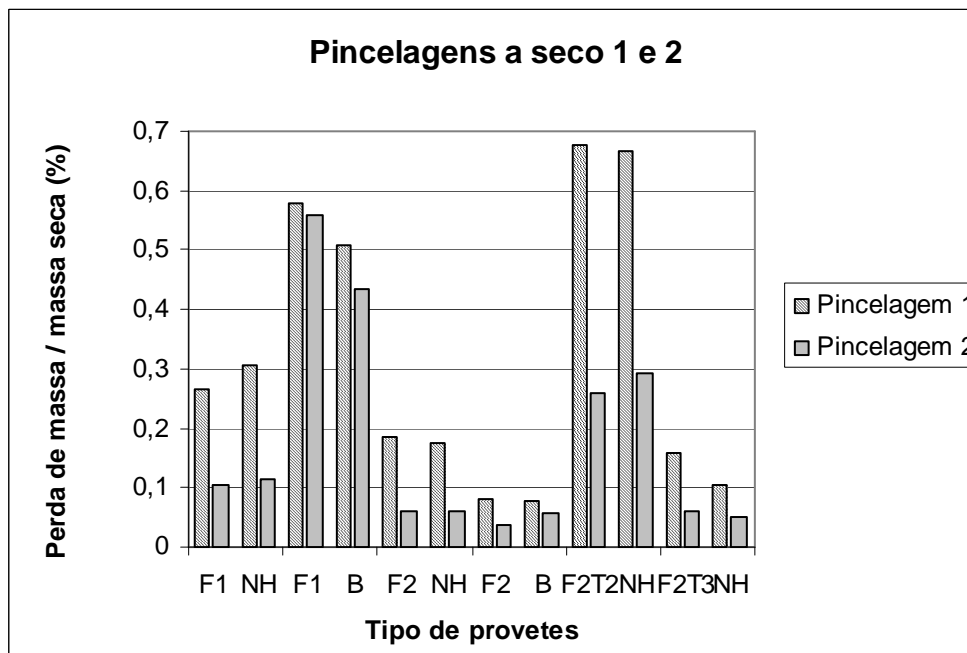


Figura 135 - Perda de massa nas pincelagens a seco 1 e 2 em relação à massa seca

Como já foi referido, com as pincelagens a seco pretendeu-se obter um efeito similar ao do vento. A pincelagem promoveu a queda de material que se encontrava solto ou praticamente solto. Nos provetes que foram perdendo massa durante os ciclos, a perda de massa devida à pincelagem é apenas uma parte da perda total de massa dos provetes devida ao ensaio.

A relação entre a perda de massa devida à pincelagem e a massa inicial seca é, em todos os provetes, maior na primeira pincelagem do que na segunda. Uma das causas para isto é que, em termos gerais e como se viu, a degradação na face superior dos provetes evoluiu pouco, pelo menos aparentemente, durante os ciclos desta fase 3 do ensaio.

No caso dos provetes F1 B a relação perda de massa/massa inicial seca foi idêntica na 1ª e na 2ª pincelagem. Após a primeira pincelagem tinha ficado muito material resultante da degradação fixado à camada de sal. A massa perdida na 2ª pincelagem pode, em parte, ser desse material que se pode ter soltado durante os ciclos.

A sequência dos tipos de provetes por ordem decrescente de perda de massa devida à pincelagem a seco 2 é a seguinte:

F1 B - F2 T2 NH - F1 NH - F2 NH - F2 T3 NH - F2 B

Considerando apenas o âmbito e nível atingido dos tipos de degradação picamento, desagregação granular e escamação, a sequência por tipos de provetes dos mais degradados para os menos degradados ao fim dos 11 ciclos da fase 3 do ensaio é a seguinte:

F1 B - F2 NH - F2 T3 NH - F1 NH - F2 B - F2 T2 NH

A maior perda de massa devida à pincelagem aconteceu nos provetes mais degradados, as diferenças entre as duas sequências apresentadas estão relacionadas com os tipos de degradação decorrentes de fissuras: fracturas e lascagem. No caso do provete F2 T2 NH outro factor que influenciou foi a queda de escamas grandes (plaquetas) do tardo dos provetes.

Tal como aconteceu na primeira pincelagem a seco, algum material resultante da degradação ficou ainda aderente aos provetes, mesmo após a pincelagem. Algum deste material estava fixado por cristais de sal. Em alguns dos provetes esse material estava fixado em camadas grossas de sal duro, que se foram formando pela acumulação de cristais de sal ao longo dos ciclos.

A Figura 136 apresenta os provetes do fabricante 1 após pincelagem e a Figura 137 os provetes do fabricante 2.

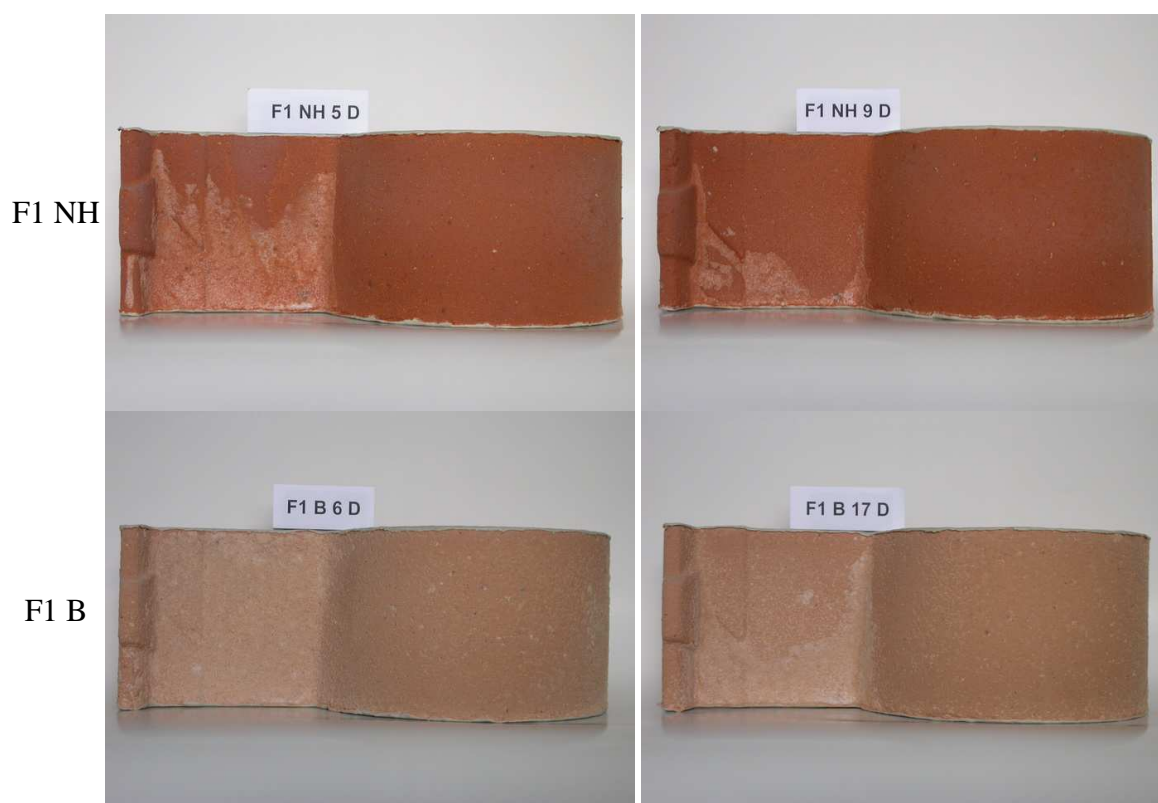


Figura 136 - Provetes do fabricante 1 após pincelagem a seco da fase 3

Após a pincelagem a seco os provetes foram sujeitos a aspersão com água desmineralizada e pincelagem com pincel húmido com o objectivo de fazer uma lavagem das superfícies, retirando o material decorrente da degradação que estava fixado aos provetes pelos cristais de sal. Com estas operações pretendeu-se obter um efeito similar ao provocado pela chuva e vento nos telhados. Também se procurou dissolver e remover as camadas de sal que alguns provetes apresentavam.

A aspersão foi feita pulverizando uniformemente por cada face dos provetes cerca de 40 ml de água desmineralizada. De seguida as faces foram pinceladas com o pincel húmido.

Em geral as superfícies dos provetes ficaram quase limpas de resíduos e das camadas de sal acumulado. Foi preciso aspergir novamente e pincelar com o pincel húmido três dos doze provetes (F1 B 6 D, F1 B 17 D, e F2 T2 NH 10 B), de modo a extrair as camadas de sal acumulado.

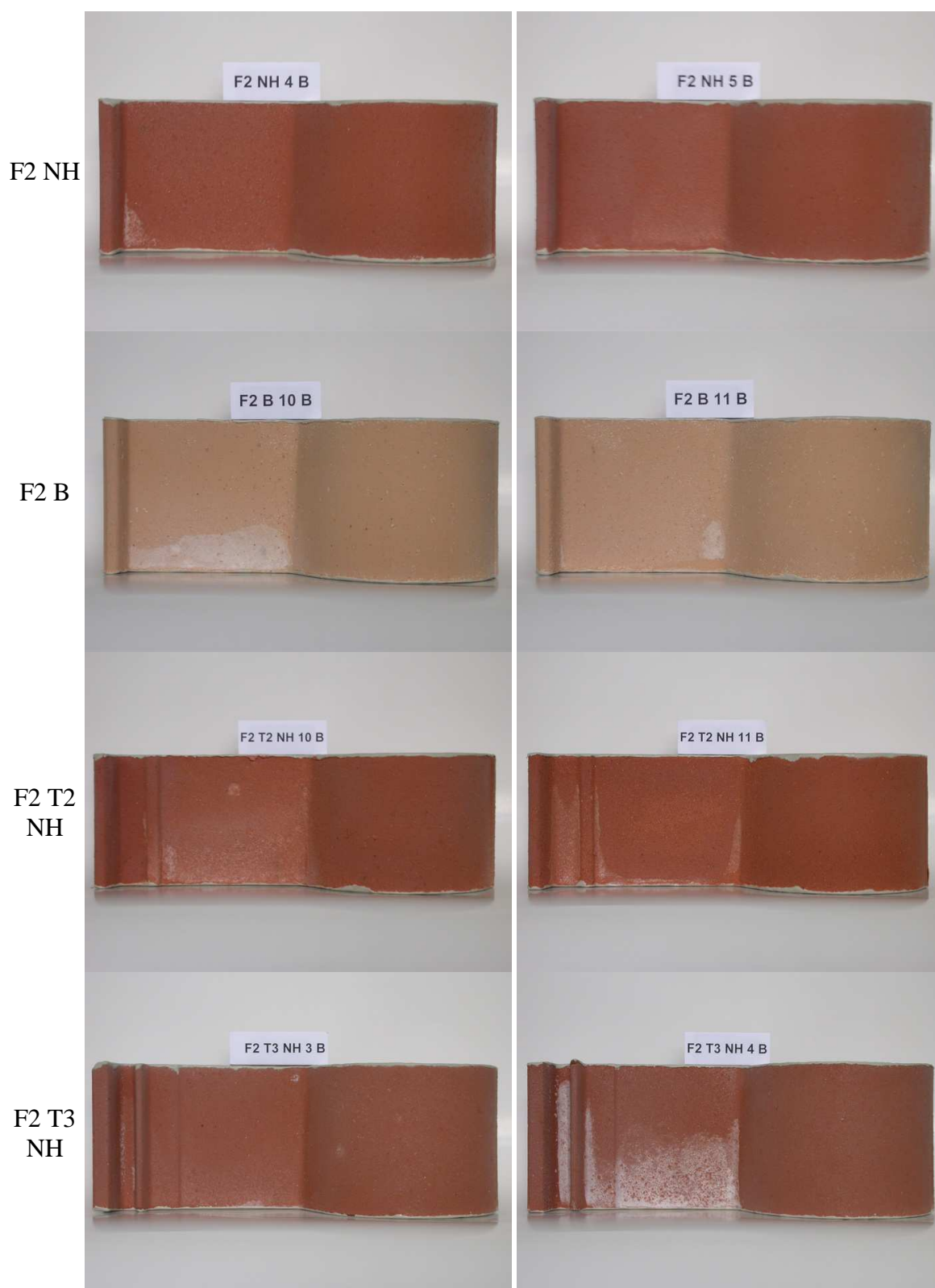


Figura 137 - Provetes do fabricante 2 após pincelagem a seco da fase 3

Nas figuras seguintes apresenta-se a variação de massa dos provetes provocada pelas operações de pincelagem a seco e aspersão e pincelagem com pincel húmido. Essa variação de massa é expressa pela relação da massa dos provetes antes e após cada operação e a massa inicial dos provetes secos.

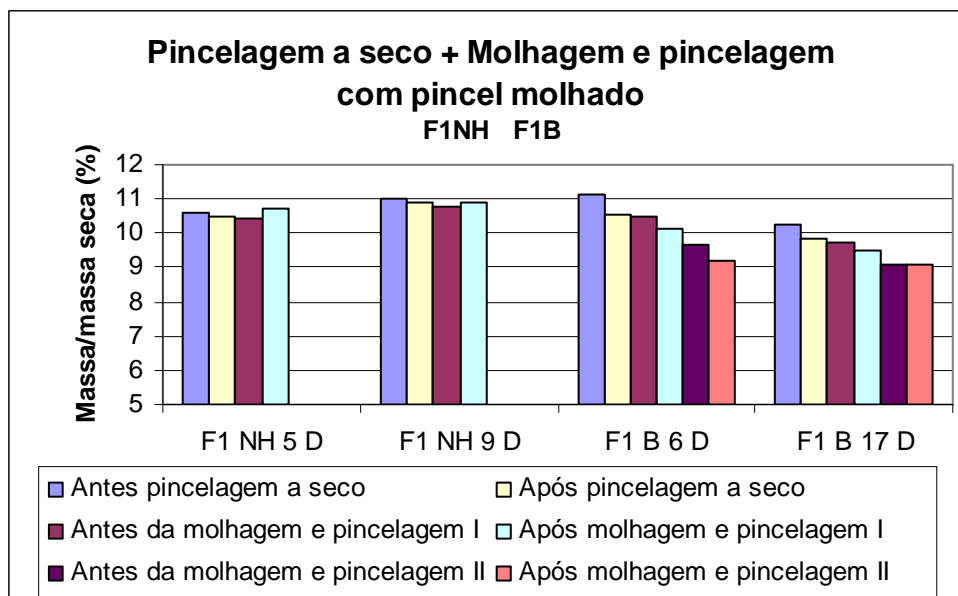


Figura 138 - Variação de massa dos provetes do fabricante 1 durante as pincelagens e molhagem da fase 3

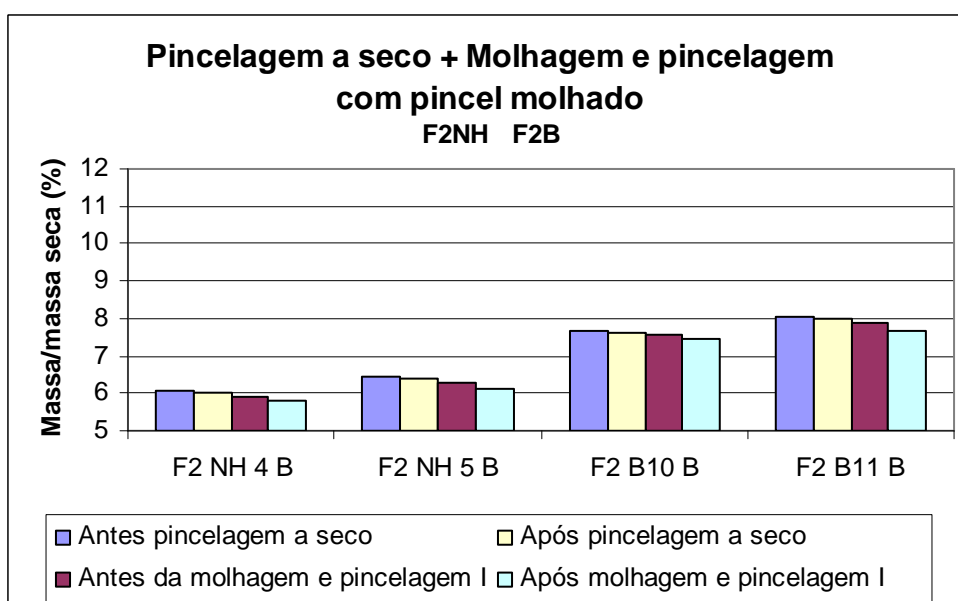


Figura 139 - Variação de massa dos provetes F2 NH e F2 B do fabricante 2 durante as pincelagens e molhagem da fase 3

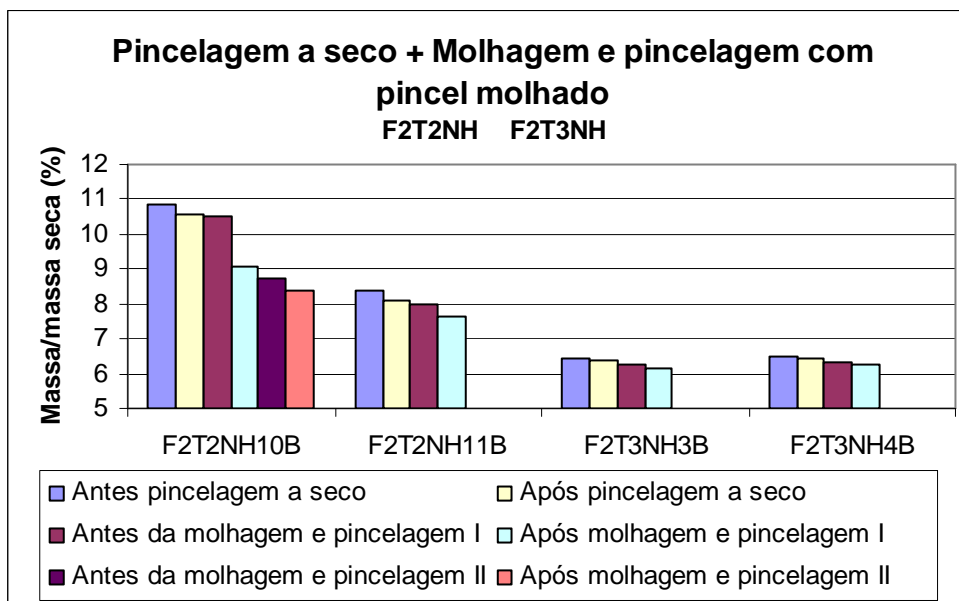


Figura 140 - Variação de massa dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2 durante as pincelagens e molhagem da fase 3

Como já foi referido todos os provetes perderam massa na sequência da pincelagem a seco, tendo perdido mais aqueles que se apresentavam mais degradados.

Apenas os provetes F1 NH apresentaram aumento de massa devido à aspersão, tendo os restantes provetes diminuído de peso. Estas alterações de massa resultam do balanço final entre:

- A perda de material cerâmico resultante da degradação que ainda estava fixado pelos cristais de sal;
- A perda de cristais de sal, em algumas zonas chegando a formar camada espessa, dissolvidos e arrastados pela água e pela pincelagem;
- O aumento de peso provocado pela aspersão, já que alguma da água foi absorvida.

Os provetes F1 B e F2 T2 NH foram os que perderam mais massa, devido a terem ainda uma grande quantidade de resíduos fixados nas camadas de sal pelos cristais. Os provetes F1 NH tinham menos material ainda fixado pelos cristais de sal.

Após os ciclos da fase 3 do ensaio composto, a pincelagem a seco, a aspersão com água desmineralizada e a pincelagem com pincel húmido, os provetes foram sujeitos a secagem

prolongada dentro da câmara de nevoeiro salino a 50 °C durante 20 dias.

A duração da secagem nesta fase 3 do ensaio foi mais prolongada do que as secagens das fases 1 e 2, que decorreram durante 10 dias e 11 dias. A secagem foi prolongada para que os provetes atingissem o estado de secos a 50 °C e ficassem assim todos no mesmo estado de secagem para enfrentar os ciclos seguintes.

As operações de aspersão e pincelagem com pincel molhado provocaram níveis diferentes de humidificação porque três dos doze provetes foram submetidos a molhagem e pincelagem por duas vezes, enquanto os restantes o foram apenas uma vez. Além disso os provetes tinham à superfície quantidades diferentes de resíduos e de camadas de cristais de sal, o que terá implicado a absorção de diferentes quantidades de água pelos provetes.

Durante a secagem os provetes foram pesados várias vezes tendo-se obtido o gráfico da Figura 141 com a variação de massa em relação à massa seca dos provetes e o Quadro 70, onde também se apresenta a absorção de água por imersão em água fria de provetes provenientes das mesmas telhas de onde foram extraídos os provetes sujeitos a este ensaio composto.

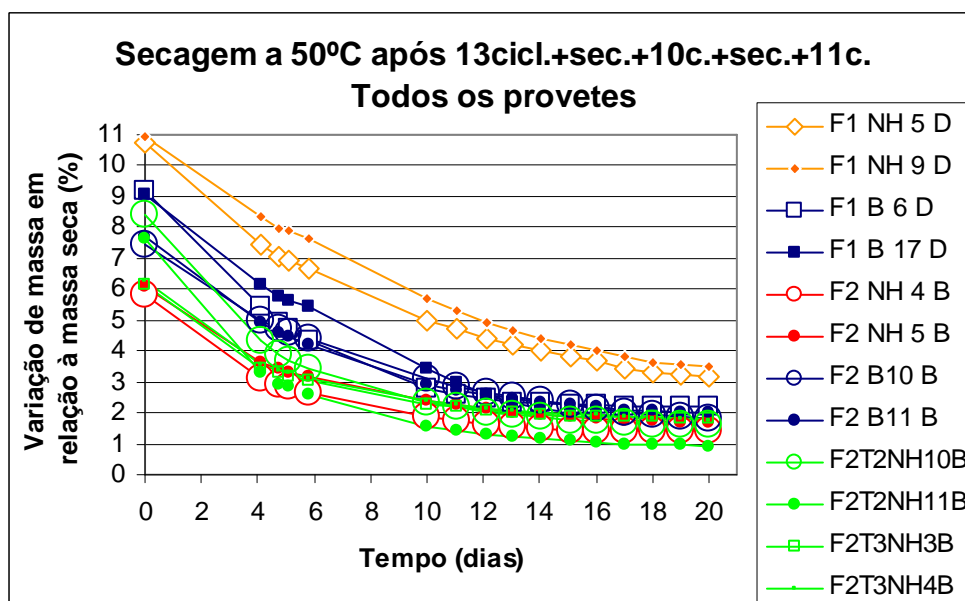


Figura 141 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 20 dias da fase 3

Após 20 dias de secagem na câmara de nevoeiro salino a massa dos provetes já estava estabilizada, tendo-se considerado que os provetes atingiram o estado de secos na câmara a 50 °C.

Na primeira e na segunda fase de secagem, de 10 e 11 dias, a massa dos provetes não chegou a estabilizar.

Quadro 70 - Secagem durante 20 dias na fase 3

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Variação de massa em relação à massa seca inicial [%]				
		Dias de secagem				
		0	10	11	19	20
F1 NH 5 D	9,2	10,7	5,0	4,7	3,2	3,2
F1 NH 9 D	9,2	10,9	5,7	5,3	3,5	3,5
F1 B 6 D	9,1	9,2	2,8	2,6	2,2	2,2
F1 B 17 D	9,2	9,1	3,4	3,0	1,8	1,8
F2 NH 4 B	5,9	5,8	1,9	1,7	1,4	1,4
F2 NH 5 B	5,9	6,1	2,4	2,2	1,7	1,7
F2 B 10 B	6,8	7,5	3,1	2,9	1,9	1,8
F2 B 11 B	6,8	7,7	2,9	2,7	2,0	2,0
F2 T2 NH 10 B	8,2	8,4	2,3	2,2	1,6	1,6
F2 T2 NH 11 B	8,2	7,6	1,6	1,4	0,9	0,9
F2 T3 NH 3 B	5,7	6,2	2,3	2,2	1,8	1,8
F2 T3 NH 4 B	5,7	6,2	2,4	2,3	1,8	1,8

Ao contrário do que aconteceu nas secagens das fases anteriores, nesta fase 3 nem todos os provetes atingiram o início da secagem com uma massa superior à sua massa seca acrescida da sua absorção de água. Na operação de pincelagem a seco, efectuada após os ciclos, todos os provetes perderam massa e na aspersão e pincelagem com pincel húmido todos os provetes com a excepção dos F1 NH também perderam massa. Após a secagem de 20 dias os provetes ficaram no estado de secos a 50 °C para enfrentar os ciclos da fase 4 do ensaio.

Para uma melhor percepção da variação de massa dos provetes, apresentam-se na Figura 142 as curvas dos provetes mais degradados e na Figura 143 as curvas dos provetes menos degradados.

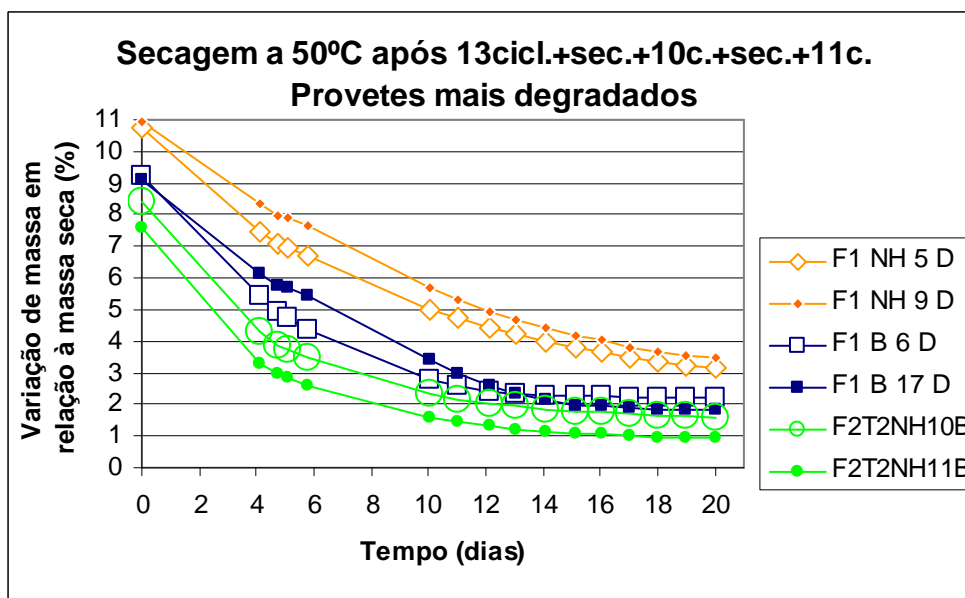


Figura 142 - Variação de massa dos provetes mais degradados durante a secagem da fase 3

Os valores da relação massa/massa seca dos provetes mais degradados aproximaram-se e terminaram no intervalo entre 0,9 % e 3,5 %.

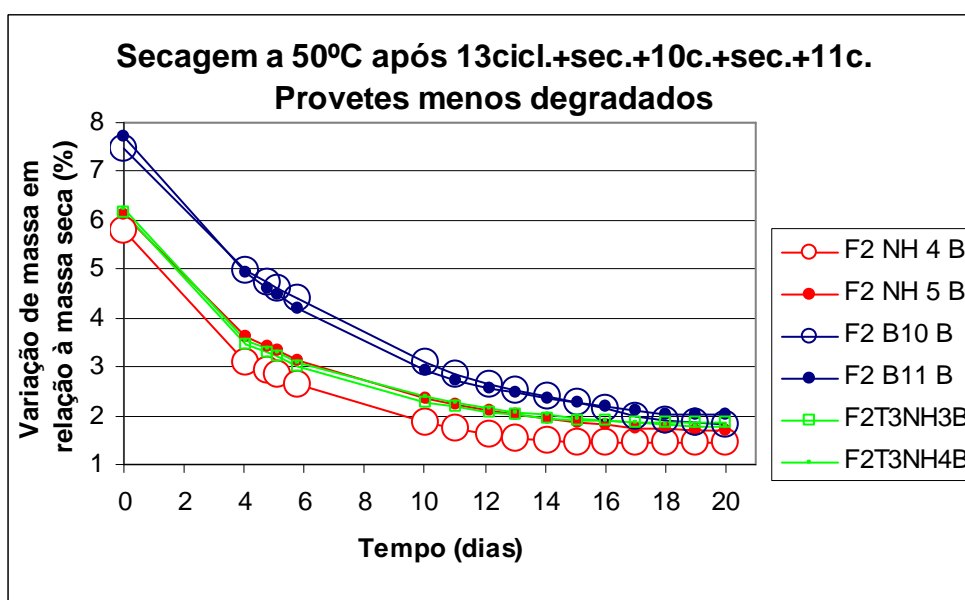


Figura 143 - Variação de massa dos provetes menos degradados durante a secagem da fase 3

Os valores da relação massa/massa seca dos provetes menos degradados aproximaram-se e terminaram no intervalo entre 1,4 % e 2,0 %.

No Quadro 71 apresentam-se os valores da variação de massa dos provetes, em relação à sua massa seca, determinados a partir das pesagens efectuadas nas secagens das diversas fases. A diferença de eficácia das secagens das 3 fases sobre cada um dos provetes está relacionada com a maior ou menor quantidade de contaminação pelo sal dos provetes no momento do início de cada secagem.

Quadro 71 - Variação de massa dos provetes decorrentes das secagens das fases 1, 2 e 3

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Variação de massa em relação à massa seca inicial [%]								
		Secagem da fase 1		Secagem da fase 2			Secagem da fase 3			
		10 dias		11 dias			20 dias			
		Dias de secagem		Dias de secagem			Dias de secagem			
		0	10	0	10	11	0	10	11	20
F1 NH 5 D	9,2	10,4	5,7	11,0	8,2	7,9	10,7	5,0	4,7	3,2
F1 NH 9 D	9,2	10,4	5,2	11,1	7,5	7,2	10,9	5,7	5,3	3,5
F1 B 6 D	9,1	9,3	4,5	9,7	5,9	5,6	9,2	2,8	2,6	2,2
F1 B 17 D	9,2	9,7	5,1	10,1	6,8	6,5	9,1	3,4	3,0	1,8
F2 NH 4 B	5,9	6,5	3,3	6,4	3,4	3,2	5,8	1,9	1,7	1,4
F2 NH 5 B	5,9	6,6	3,4	6,5	3,5	3,3	6,1	2,4	2,2	1,7
F2 B 10 B	6,8	7,9	5,6	7,9	5,7	5,5	7,5	3,1	2,9	1,8
F2 B 11 B	6,8	7,9	5,4	7,8	5,3	5,0	7,7	2,9	2,7	2,0
F2T2NH10B	8,2	10,1	5,5	10,5	7,4	7,2	8,4	2,3	2,2	1,6
F2T2NH11B	8,2	9,3	4,7	9,0	5,6	5,3	7,6	1,6	1,4	0,9
F2T3 NH 3B	5,7	6,5	3,4	6,4	3,0	2,9	6,2	2,3	2,2	1,8
F2T3 NH 4B	5,7	6,5	3,6	6,4	3,3	3,1	6,2	2,4	2,3	1,8

Na Figura 144 apresentam-se os provetes do fabricante 1 após 20 dias de secagem da fase 3 do ensaio composto.



Figura 144 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 3

Na Figura 145 apresentam-se os provetes do fabricante 2 após 20 dias de secagem da fase 3 do ensaio composto.

Tal como aconteceu nas secagens prolongadas da fase 1 e da fase 2, também se observa o aumento da presença de sal cristalizado à superfície dos provetes, que é mais visível no caso dos provetes F2 NH e F2 T3 NH.

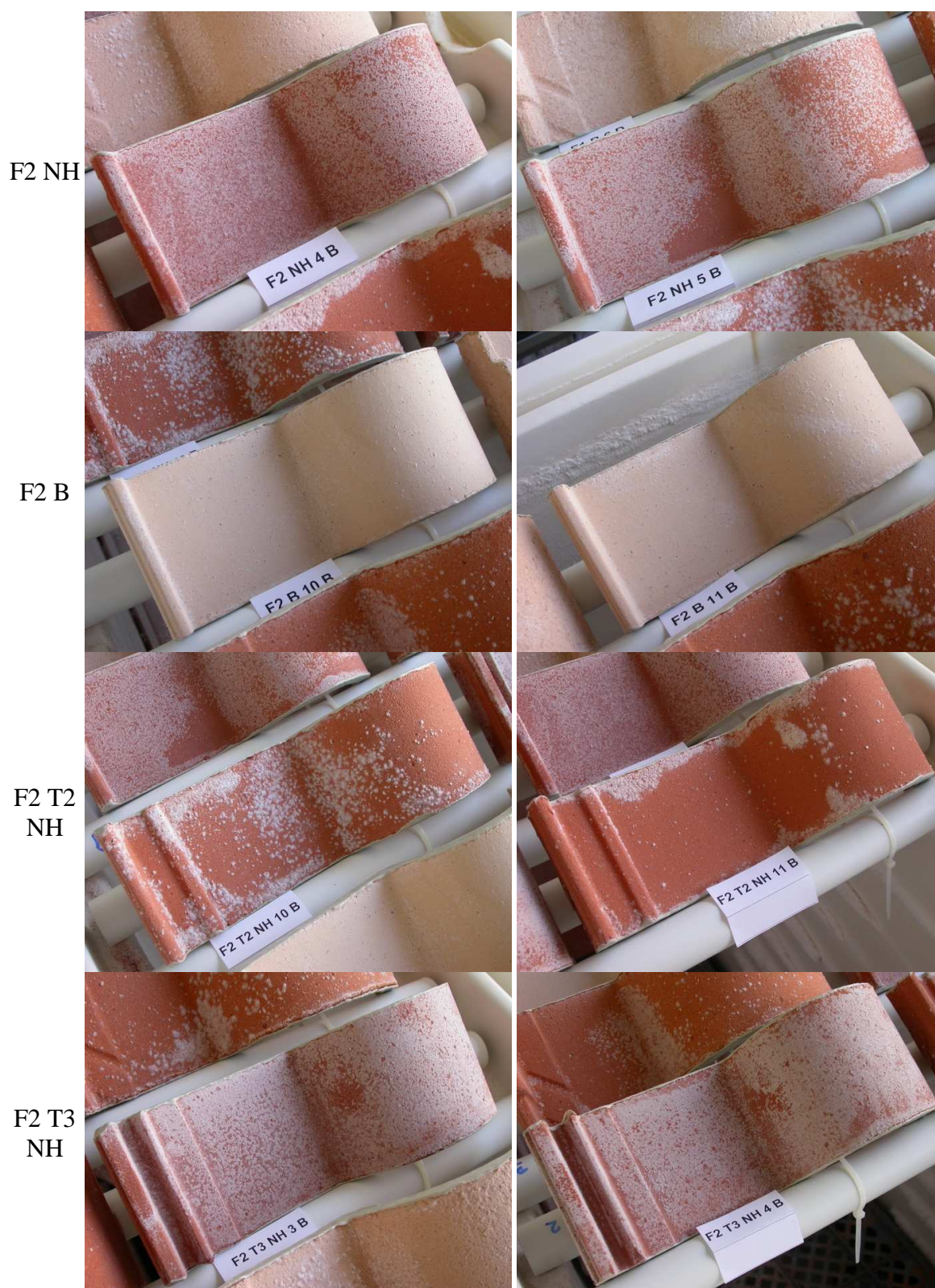


Figura 145 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 3

5.4.5.5 Fase 4 - 15 ciclos seguidos de 44 dias de secagem e de pincelagem

No início desta última fase do ensaio composto os provetes estavam num estado de secos a 50 °C, as superfícies estavam quase livres de resíduos provenientes da degradação sofrida anteriormente e praticamente livres das camadas de sal cristalizado que se tinham acumulado progressivamente nas fases anteriores.

A superfície exposta era agora uma superfície degradada que tinha pertencido ao interior do provete. Tenta-se assim averiguar o comportamento numa zona interior dos provetes face ao ataque cíclico de nevoeiro salino/secagem. Claro que os provetes estavam contaminados com sal que se foi acumulando no interior dos provetes ao longo das várias fases do ensaio composto.

Na Figura 146 apresenta-se o estado dos provetes do fabricante 1 após 15 ciclos de nevoeiro salino seguido de secagem da fase 4 do ensaio e na Figura 147 o estado dos provetes do fabricante 2.



Figura 146 - Provetes do fabricante 1 após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4

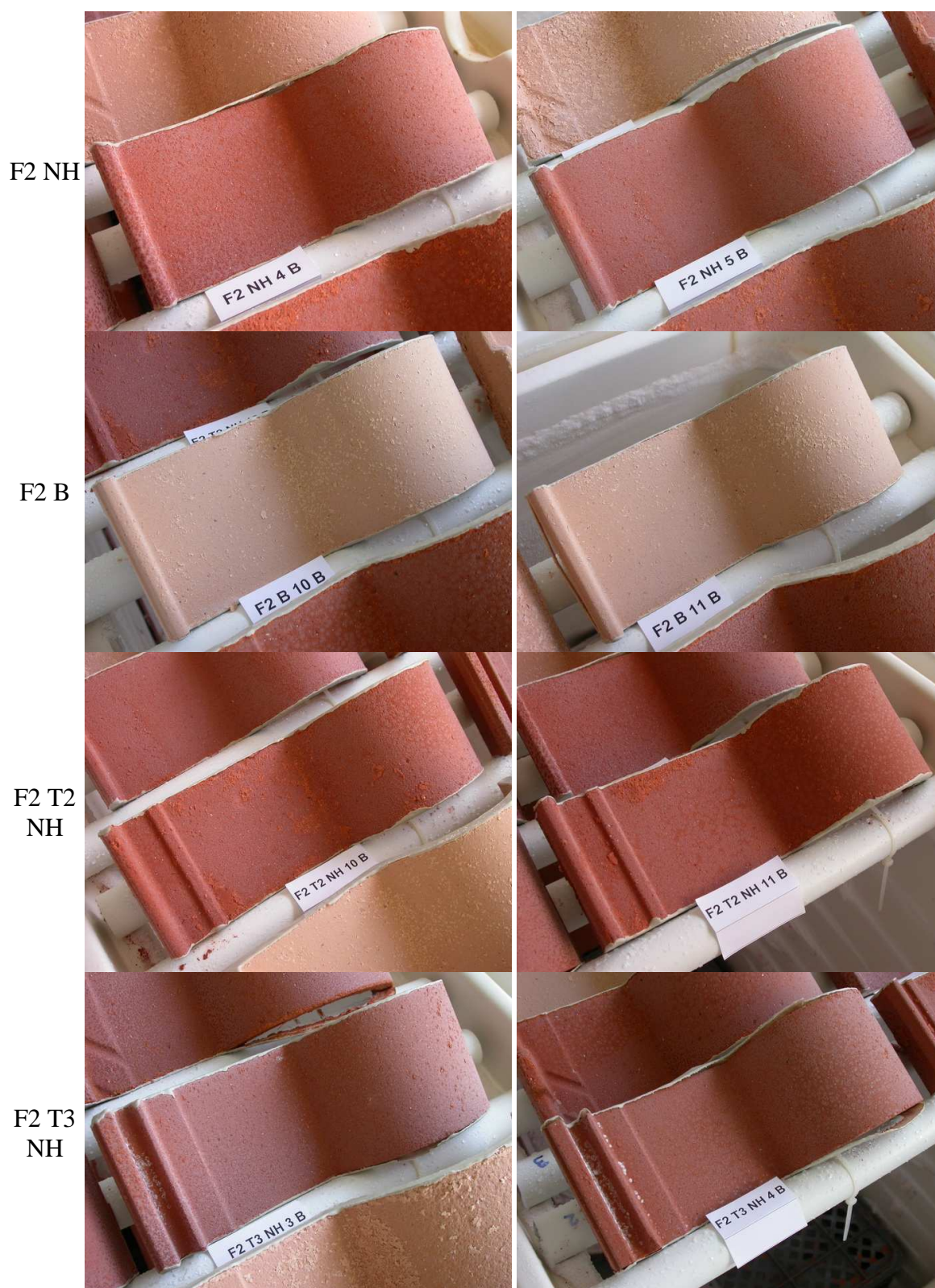


Figura 147 - Provetes do fabricante 2 após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4

No Quadro 72 apresenta-se o resumo da inspecção visual realizada a todos os provetes após 15 ciclos da fase 4, com a indicação dos tipos de degradação observada. Também se apresentam os resultados da inspecção visual das fases 2 e 3 deste ensaio composto.

Tal como aconteceu nas fases cíclicas anteriores, a degradação avaliada visualmente evoluiu mais rapidamente nos primeiros ciclos, essa evolução diminuiu gradualmente nos ciclos seguintes até aparentemente parar nos últimos ciclos.

Tal como na fase 3 do ensaio composto, a degradação nas formas de picamento, desagregação granular e escamação da face superior dos provetes resultante dos ciclos de nevoeiro salino/secagem desta fase 4 do ensaio atingiu um nível baixo na generalidade dos provetes.

Não considerando a degradação de âmbito localizado provocada pelo processo fissura - fractura - lascagem, a sequência por tipos de provetes dos mais degradados para os menos degradados ao fim dos 15 ciclos da fase 4 do ensaio é a seguinte:

F1 B - F2 NH - F2 B - F2 T2 NH - F2 T3 NH - F1 NH

Os provetes F1 B são os mais degradados. Para além dos tipos de degradação observados nos ciclos anteriores, estes provetes apresentam agora, e pela primeira vez em todas as fases do ensaio composto, o tipo de degradação folheado ou esfoliação lamelar.

O folheado é definido como uma esfoliação lamelar que pode conduzir a uma desagregação do corpo cerâmico numa sucessão de planos paralelos [14].

A esfoliação é uma perda progressiva de material atingindo toda ou parte da espessura do produto [14] ou uma divisão múltipla em lâminas finas paralelas entre si [13].

É de assinalar que nos ciclos desta fase 4 os provetes do tipo F2 B degradaram-se mais do que nas fases anteriores.

Quadro 72 - Inspeção visual após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4

Tipo de provetes	Após 15 ciclos da fase 4 do ensaio composto		Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto	
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degrad. no ensaio cíclico
F1 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	A degradação tem âmbito localizado, junto às arestas superior e inferior dos provetes. Na restante superfície superior a degradação provocada por estes ciclos é de nível baixo.	Picamento Desagregação granular Pouca escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre em arestas da junta da aba.	Picamento Desagregação granular Escamação	+++
F1 B	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem Folheado ou esfoliação lamelar	Degradação de âmbito generalizado. São os provetes mais degradados. Escamas maiores que as dos outros provetes. Muitas escamas em todas as superfícies. Algumas terão sido formadas em fases anteriores. Os processos fissura-fractura-lascagem ocorrem em arestas das juntas da aba e do canudo.	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem	Degradação de âmbito generalizado. São os provetes mais degradados. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre em arestas da face exterior da junta da aba e da junta do canudo.	Picamento Desagregação granular Escamação	+++

Quadro 72 - Inspeção visual após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4 (cont.)

Tipo de prove-tes	Após 15 ciclos da fase 4 do ensaio composto		Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto	
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico
F2 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo.	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre num provete, na aresta da junta da aba e na face inferior, no vinco do molde.	Picamento Desagregação granular Escamação	++ Maior degradação do que no ciclo 30 do ensaio cíclico
F2 B	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem	Picamento, desagregação granular e escamação de âmbito generalizado e de nível baixo, mas superior ao atingido na fase 3. Os processos fissura-fractura-lascagem ocorrem em arestas da junta do canudo e da junta da aba dos dois provetes.	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras/ Fracturas/ Lascagem	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre na aresta inferior da junta da aba dos dois provetes.	Picamento Desagregação granular Escamação	- Inferior à do ciclo 10 e do ciclo 30 do ensaio cíclico

Quadro 72 - Inspeção visual após 15 ciclos de nevoeiro/secagem da fase 4 (cont.)

Tipo de prove-tes	Após 15 ciclos da fase 4 do ensaio composto		Após 11 ciclos da fase 3 do ensaio composto		Após 10 ciclos da fase 2 do ensaio composto	
	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Observações	Tipos de degradação	Degradação relativa e comparação com degradação no ensaio cíclico
F2 T2 NH	Picamento	Picamento, desagregação granular e escamação, empolamento e plaquetas de âmbito localizado. Os processos fissura-fractura-lascagem ocorrem em arestas da junta do canudo e da junta da aba.	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo. O processo fissura-fractura-lascagem é localizado e ocorre nas arestas da junta do canudo dos dois provetes.	Picamento	+++
	Desagregação granular		Desagregação granular		Desagregação granular	
	Escamação		Escamação		Escamação	
	Empolamento		Fissuras/ Fracturas/ Lascagem			
	Plaquetas					
F2 T3 NH	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo.	Picamento	Degradação de âmbito generalizado e de nível baixo.	Picamento	+
	Desagregação granular		Desagregação granular		Desagregação granular	
	Escamação		Escamação		Escamação	

Os provetes F2 T2 NH apresentaram, na fase 3 do ensaio, picamento, desagregação granular e escamação, de âmbito generalizado e nível baixo. Nesta fase 4 tiveram um comportamento diferente. Estes tipos de degradação ocorreram com âmbito localizado, no entanto atingiram um nível superior com a formação de empolamento e plaquetas.

Os processos de degradação fissura - fractura - lascagem, de âmbito localizado, ocorrem nos provetes dos tipos F1 B, F2 B e F2 T2 NH. Estes tipos de degradação manifestaram-se visualmente na fase anterior e continuaram a evoluir nesta fase do ensaio.

Os provetes do tipo F1 NH, F2 NH e F2 T3 NH não apresentam fissuras – fracturas – – lascagem ao fim dos 15 ciclos da fase 4 do ensaio.

Na Figura 148 apresenta-se a evolução da degradação localizada do provete F2 B 11 B, que se tinha manifestado na fase anterior (Figura 133).

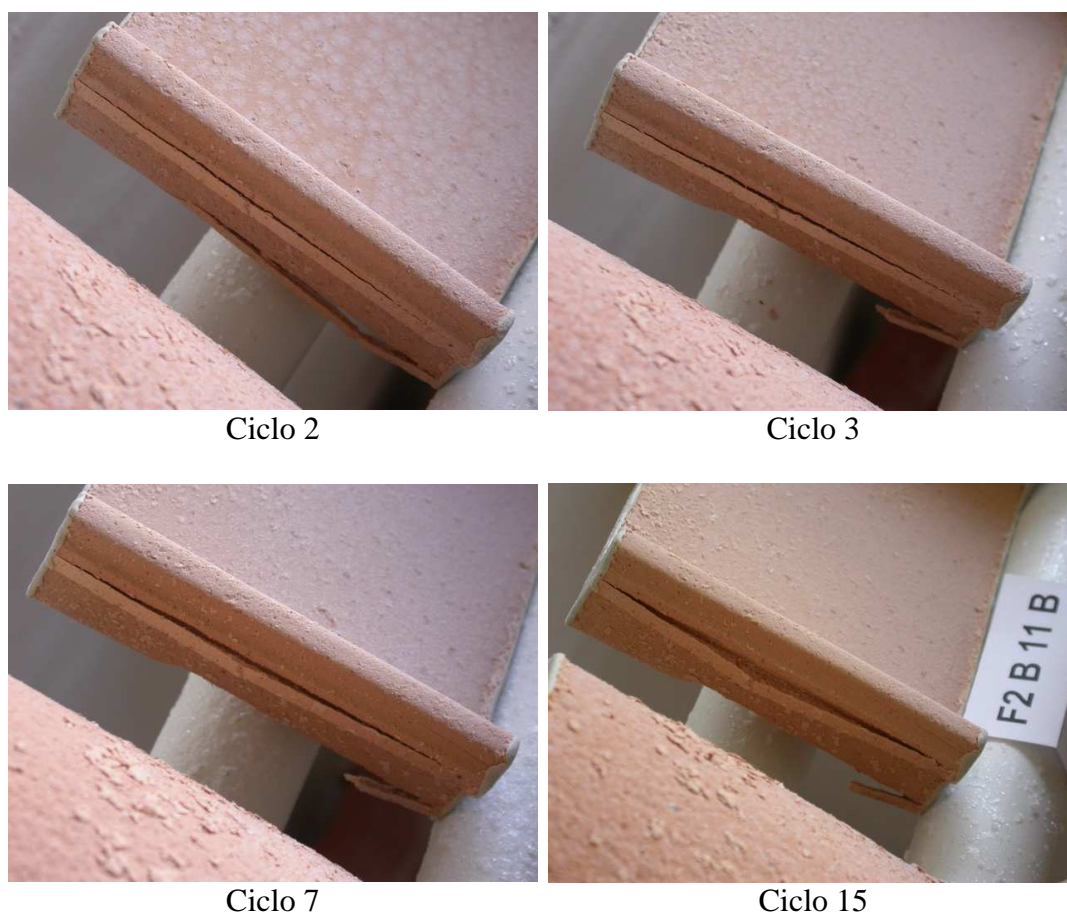


Figura 148 - Evolução da degradação localizada do provete F2 B 11 B nos ciclos da fase 4

Depois dos 15 ciclos de nevoeiro salino/secagem da fase 4 do ensaio composto os provetes foram mantidos na câmara de nevoeiro salino e submetidos a secagem prolongada a 50 °C até a sua massa estabilizar. A secagem decorreu durante 44 dias, tendo então os provetes atingido o estado de secos a 50 °C.

Durante a secagem os provetes foram pesados várias vezes tendo-se obtido o gráfico da Figura 149 com a variação de massa em relação à massa seca dos provetes e o Quadro 73, onde também se apresenta a absorção de água por imersão em água fria de provetes provenientes das mesmas telhas de onde foram extraídos os provetes sujeitos a este ensaio composto.

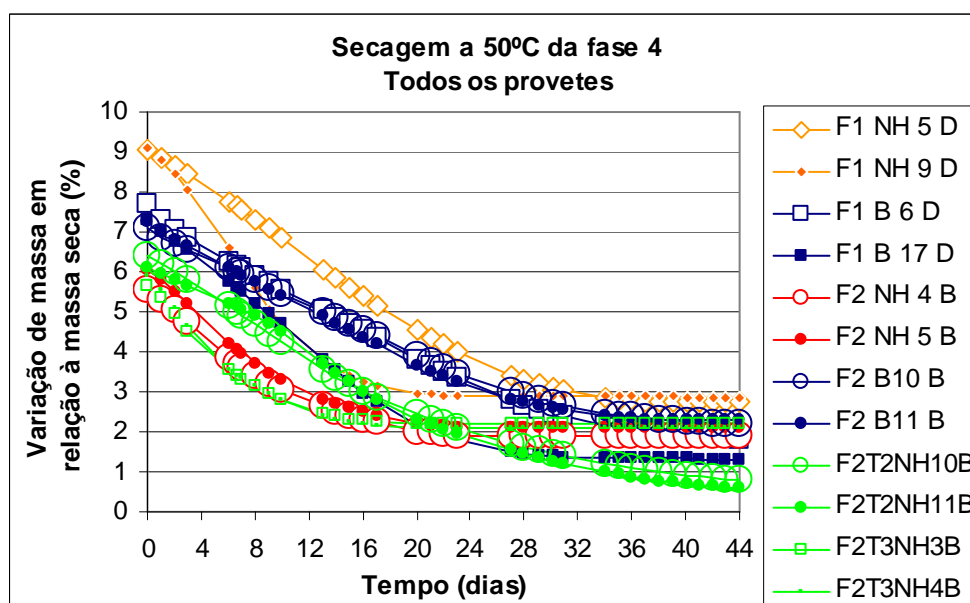


Figura 149 - Variação de massa dos provetes durante a secagem de 44 dias da fase 4

No início da secagem desta fase 4 do ensaio apenas quatro dos doze provetes apresentam uma variação de massa em relação à sua massa inicial seca superior à absorção de água. Estes quatro provetes pertencem ao grupo dos menos degradados.

A massa dos provetes neste momento do ensaio é consequência das perdas e ganhos de massa durante todas as fases anteriores do ensaio e dos ciclos desta fase 4.

Quadro 73 - Secagem durante 44 dias na fase 4

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Variação de massa em relação à massa seca inicial [%]					
		Dias de secagem					
		0	10	20	30	43	44
F1 NH 5 D	9,2	9,1	6,8	4,5	3,1	2,7	2,7
F1 NH 9 D	9,2	9,1	4,7	2,9	2,9	2,9	2,9
F1 B 6 D	9,1	7,7	5,6	3,8	2,5	1,8	1,8
F1 B 17 D	9,2	7,3	4,7	2,2	1,4	1,3	1,3
F2 NH 4 B	5,9	5,6	3,1	2,0	1,9	1,9	1,9
F2 NH 5 B	5,9	6,0	3,3	2,2	2,1	2,1	2,1
F2 B 10 B	6,8	7,1	5,5	3,9	2,7	2,2	2,2
F2 B 11 B	6,8	7,3	5,4	3,7	2,6	2,3	2,3
F2 T2 NH 10 B	8,2	6,4	4,2	2,4	1,5	0,81	0,79
F2 T2 NH 11 B	8,2	6,1	4,5	2,3	1,3	0,61	0,58
F2 T3 NH 3 B	5,7	5,6	2,8	2,2	2,2	2,2	2,2
F2 T3 NH 4 B	5,7	5,9	2,8	2,1	2,1	2,1	2,1

Para uma melhor percepção da variação de massa apresentam-se na Figura 150 as curvas dos provetes mais degradados e na Figura 151 as curvas dos provetes menos degradados. Os valores da relação massa/massa seca dos provetes mais degradados terminaram no intervalo entre 0,58 % e 2,9 % e a dos provetes menos degradados no intervalo entre 1,9 % e 2,3 %.

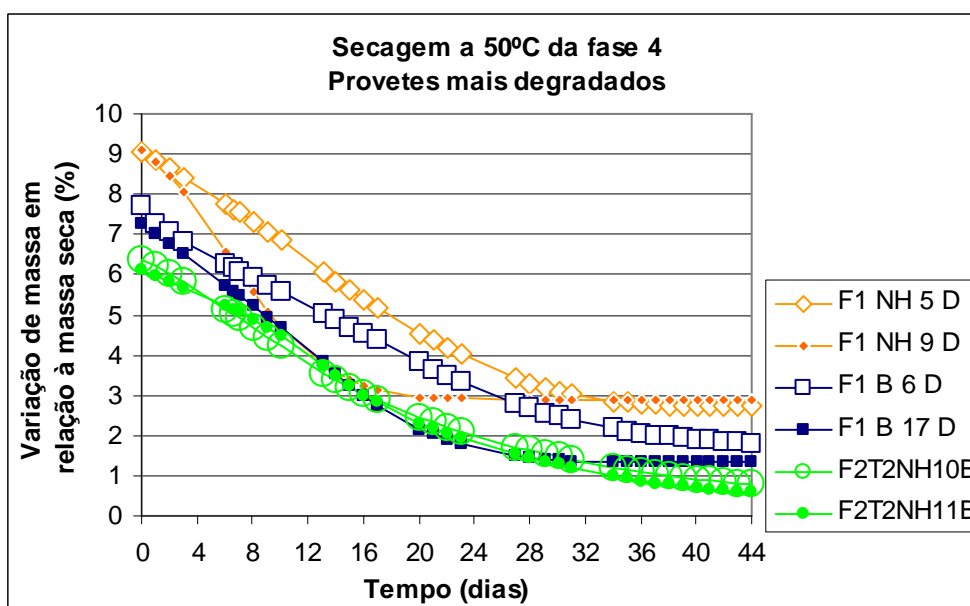


Figura 150 - Variação de massa dos provetes mais degradados durante a secagem da fase 4

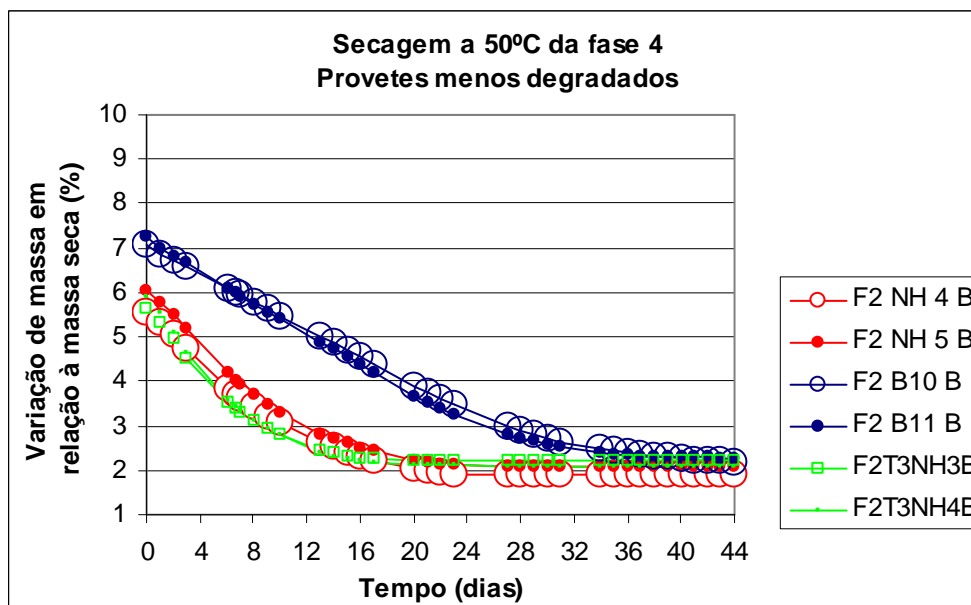


Figura 151 - Variação de massa dos provetes menos degradados durante a secagem da fase 4

Na Figura 152 apresentam-se os provetes do fabricante 1 após 44 dias de secagem da fase 4 do ensaio composto e na Figura 153 os provetes do fabricante 2.



Figura 152 - Provetes do fabricante 1 após secagem da fase 4

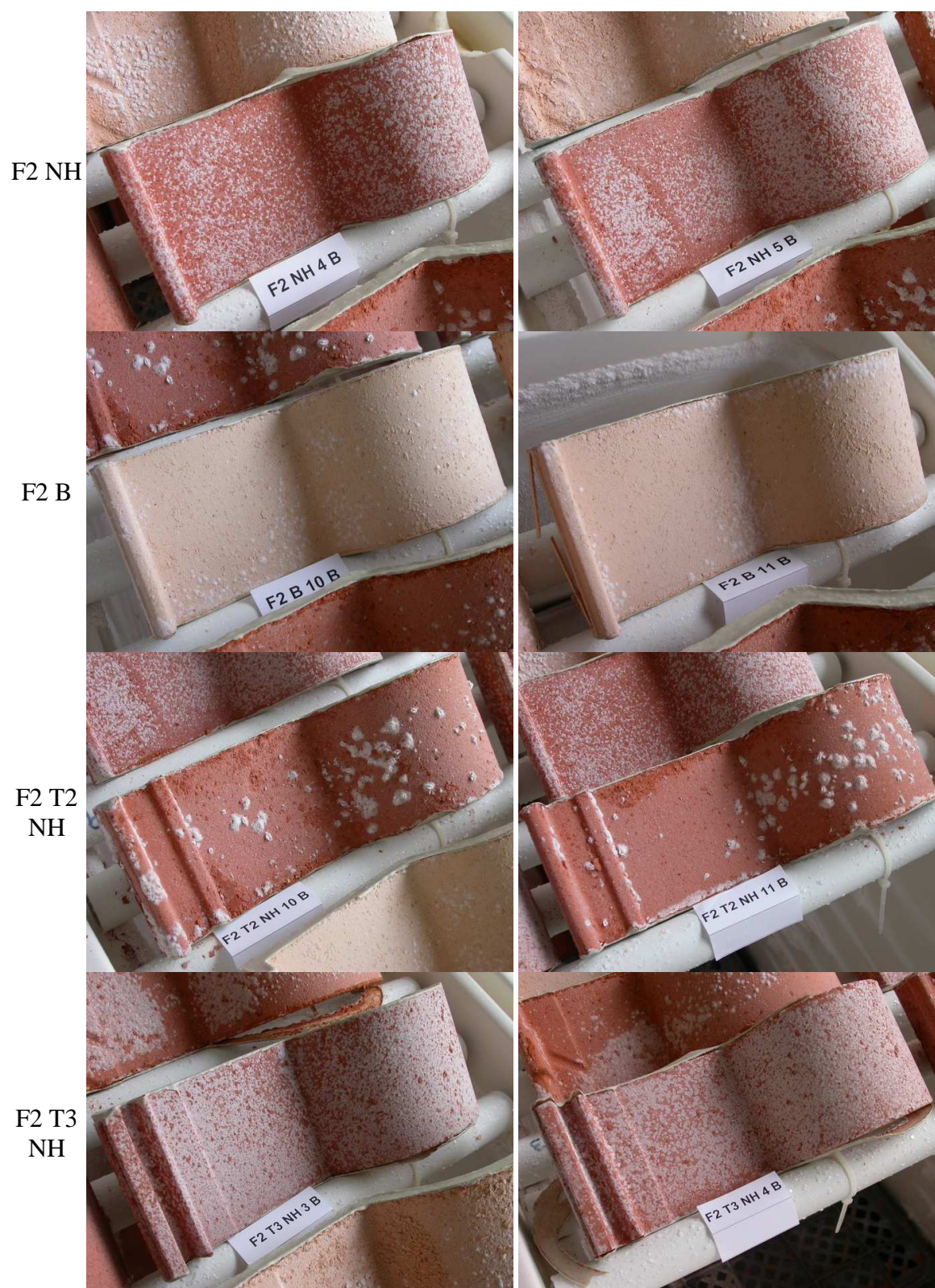


Figura 153 - Provetes do fabricante 2 após secagem da fase 4

Tal como aconteceu nas secagens prolongadas da fase 1, da fase 2 e da fase 3, também se observa o aumento da presença de sal cristalizado à superfície dos provetes, que é mais visível no caso dos provetes F2 NH e F2 T3 NH.

A secagem dos provetes durante 44 dias promoveu, aparentemente, a evolução da degradação dos provetes, que é mais evidente nos provetes dos tipos F1 NH, F1 B e F2 B.

Nas figuras seguintes apresentam-se pormenores de alguns provetes após a secagem. Na Figura 154 vê-se que na face inferior do canudo dos provetes F1 NH a degradação é do mesmo tipo da observada na face superior, com a diferença da existência de uma plaqueta que se está a formar e que irá cair na operação de pincelagem que se segue.

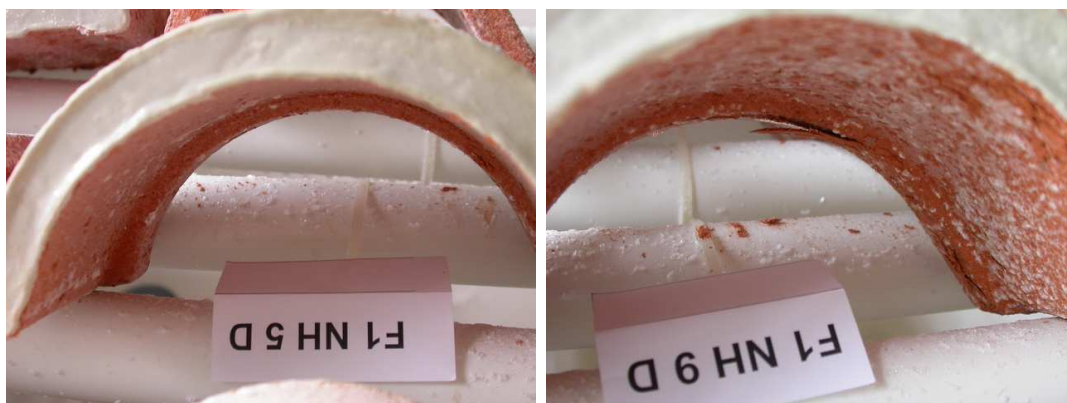


Figura 154 - Face inferior da aba dos provetes F1 NH após secagem da fase 4

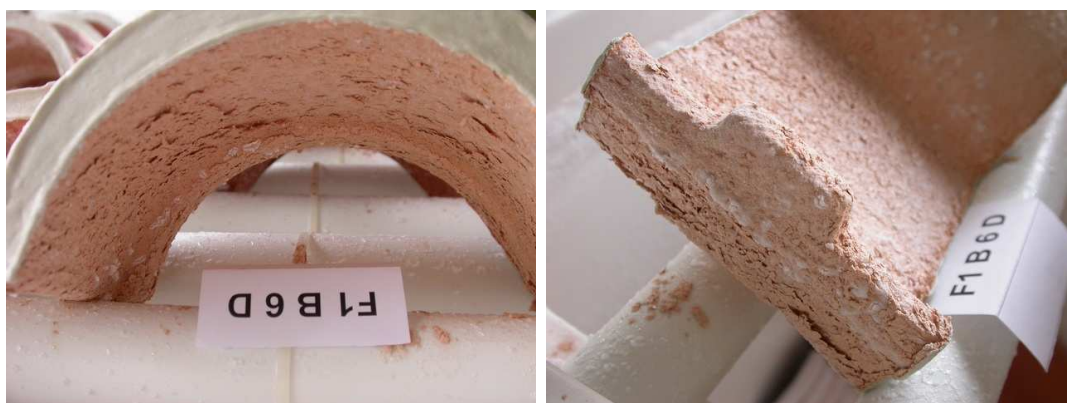


Figura 155 - Aspectos da degradação do provete F1 B 6 D após secagem da fase 4

Na Figura 155 e na Figura 156 observa-se a degradação de âmbito generalizado dos provetes F1 B, onde é evidente a degradação do tipo folheado ou esfoliação lamelar.

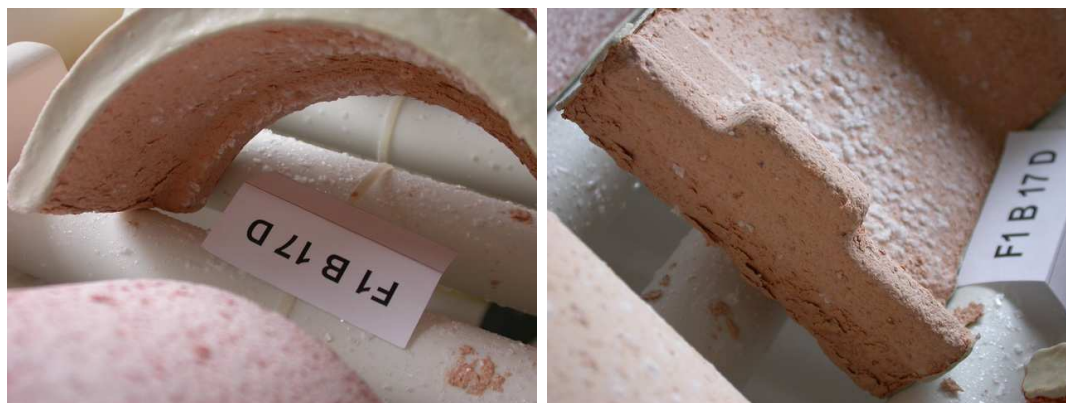


Figura 156 - Aspectos da degradação do provete F1 B 17 D após secagem da fase 4

Na Figura 157 verifica-se a o nível superior de degradação do provete F2 B 10 B nesta fase 4 em comparação com a degradação nas fases anteriores.



Figura 157 - Pormenor do provete F2 B 10 B após secagem da fase 4

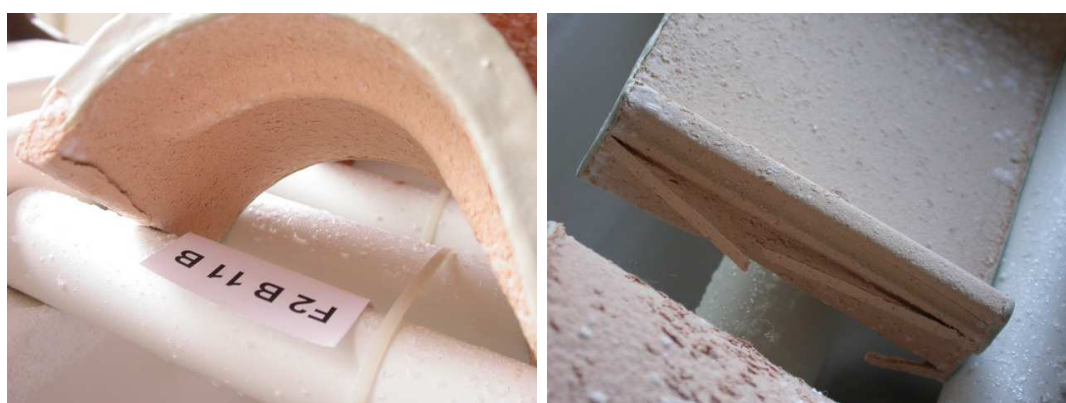


Figura 158 - Degradação localizada do provete F2 B 11 B após secagem da fase 4

Na primeira imagem da Figura 158 apresenta-se a fissura na junta do canudo do provete F2 B 11 B, que na pincelagem que se segue irá provocar uma fractura e o destacamento de uma lasca. A segunda imagem da Figura 158 apresenta a junta da aba onde se observa que a secagem provocou maior afastamento das lascas relativamente ao provete face ao seu estado antes da secagem (Figura 148). Na operação de pincelagem as lascas da junta do canudo e da junta da aba vão destacar-se do provete.

Nas imagens parciais do tardo do canudo dos provetes F2 T2 NH (Figura 159) observa-se a formação de lascas e de escamas, que se irão destacar na pincelagem.



Figura 159 - Pormenor da face inferior do canudo dos provetes F2 T2 NH após secagem da fase 4

Após secagem da fase 4 os provetes foram passados com um pincel seco. No Quadro 74 apresentam-se os valores da massa perdida e os tipos de resíduos resultantes desta pincelagem a seco 3 (fase 4 do ensaio composto) e da pincelagem a seco 2 (fase 3 do ensaio composto).

Na pincelagem a seco 3, o pincel removeu material na forma de cristais de sal e material cerâmico nas formas de pó, escamas, plaquetas, lascas e outros fragmentos. De alguns provetes também se destacaram pequenos fragmentos de resina.

Quadro 74 - Pincelagem a seco 3, após 15 ciclos de nevoeiro/secagem e 44 dias de secagem da fase 4

Pro- vete	3ª pincelagem a seco (fase 4)				2ª pincelagem a seco (fase 3)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observa- ções após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F1 NH 5 D	1,26	0,14	Pó Escamas Poucos cristais de sal. Escamas mais espessas (lascas), do tardoz. Resina	Não ficou material aderente fixado.	0,92	0,11	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas) Resina	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.
F1 NH 9 D	3,03	0,34	Pó Escamas Poucos cristais de sal. Muitas escamas mais espessas (lascas), do tardoz. Uma escama com área grande mas fina (plaqueta), do tardoz. Resina		1,01	0,11		

Quadro 74 - Pincelagem a seco 3, após 15 ciclos de nevoeiro/secagem e 44 dias de secagem da fase 4 (cont.)

Pro- vete	3ª pincelagem a seco (fase 4)				2ª pincelagem a seco (fase 3)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observa- ções após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F1 B 6 D	16,28	2,06	Pó Escamas Escamas espessas (lascas). Escamas com área grande mas finas (plaquetas). Sal Resina	Após pincelagem ainda ficou material fixado no tardoz e na face superior.	4,40	0,56	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas). Escamas grandes que tinham ficado aderentes às camadas de sal, da face superior e do tardoz, após a primeira pincelagem a seco.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados no tardoz e na face superior.
F1 B 17 D	8,18	1,05	Pó Escamas Escamas espessas (lascas). Sal Lascas da junta do canudo. Resina		3,40	0,44	Com a pincelagem caíram algumas lascas provenientes das fissuras e fracturas.	

Quadro 74 - Pincelagem a seco 3, após 15 ciclos de nevoeiro/secagem e 44 dias de secagem da fase 4 (cont.)

Pro- vete	3ª pincelagem a seco (fase 4)				2ª pincelagem a seco (fase 3)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F2 NH 4 B	0,69	0,10	Pó Escamas Sal	Ficou algum material fixado.	0,44	0,06	Pó Escamas Sal 2 lascas, uma da aresta da junta da aba e outra da face inferior, na junta do molde.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.
F2 NH 5 B	0,62	0,09			0,44	0,06	Pó Escamas Sal	
F2 B 10 B	2,28	0,34	Pó Escamas Sal Lascas	Ficou material fixado.	0,24	0,04	Pó Escamas Sal	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.
F2 B 11 B	3,00	0,44	Pó Escamas Sal Lascas		0,39	0,06		

Quadro 74 - Pincelagem a seco 3, após 15 ciclos de nevoeiro/secagem e 44 dias de secagem da fase 4 (cont.)

Pro- vete	3ª pincelagem a seco (fase 4)				2ª pincelagem a seco (fase 3)			
	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observa- ções após pincela- gem	Massa perdida na pincelagem a seco [g]	100 x massa perdida na pincelagem/ massa do provete seco [%]	Tipo de resíduos	Observações após pincelagem
F2 T2 NH 10 B	2,84	0,38	Pó Escamas Escamas espessas (lascas) e escamas grandes (plaquetas) da face superior e do tarsoz. Sal Resina	Ficou pouco material fixado.	1,92	0,26	Pó Escamas Sal Escamas mais espessas (lascas). Escamas grandes ou plaquetas no tarsoz, que tinham ficado aderentes à camada de sal após a primeira pincelagem a seco. Com a pincelagem caíram algumas lascas provenientes das fissuras e fracturas nas arestas da junta do canudo.	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície: escamas grandes no tarsoz e grãos ou pó na face superior.
F2 T2 NH 11 B	2,22	0,30	Pó Escamas Escamas grandes (plaquetas). Escama espessa (lasca) do tarsoz da junta do canudo. Sal Resina		2,19	0,29		
F2T3 NH 3 B	0,63	0,08	Muitos cristais de sal. Pó Escamas	Não ficou material fixado.	0,46	0,06	Pó Escamas Alguma resina	Após pincelagem ainda ficaram resíduos fixados à superfície.
F2T3 NH 4 B	1,28	0,16			0,39	0,05	Pó Escamas Sal Resina	

Nas figuras seguintes apresentam-se aspectos da degradação localizada de alguns provetes após a pincelagem da fase 4 do ensaio. Nalgumas imagens também é possível ver as lascas que se destacaram na sequência da pincelagem.

Na Figura 160 apresenta-se uma imagem parcial do tardo do provete F1 B 17 D e as lascas que se destacaram da junta do canudo durante a pincelagem. Esta imagem pode ser comparada com a do provete antes da pincelagem apresentada na Figura 156. No provete F2 T2 NH 10 B é visível a falta de material na aresta da junta do canudo. Neste caso a lasca destacou-se durante as pincelagens efectuadas na fase 3 do ensaio.



Figura 160 - Provetes F1 B 17 D e F2 T2 NH 10 B após pincelagem a seco da fase 4

Na Figura 161 apresentam-se aspectos dos provetes do tipo F2 B após pincelagem. No caso do provete F2 B 10 B a lasca da junta do canudo cuja falta se observa destacou-se durante a pincelagem desta fase 4, enquanto o material em falta na junta da aba se destacou durante os ciclos da fase 3 (Figura 132). No provete F2 B 11 B as lascas que se apresentam destacaram-se durante a pincelagem desta fase 4 e pode comparar-se o estado do provete antes e depois da pincelagem comparando esta figura com a Figura 158.

O gráfico da Figura 162 apresenta a massa perdida pelos provetes nas pincelagens a seco 1, 2 e 3, em relação à massa seca inicial dos provetes.

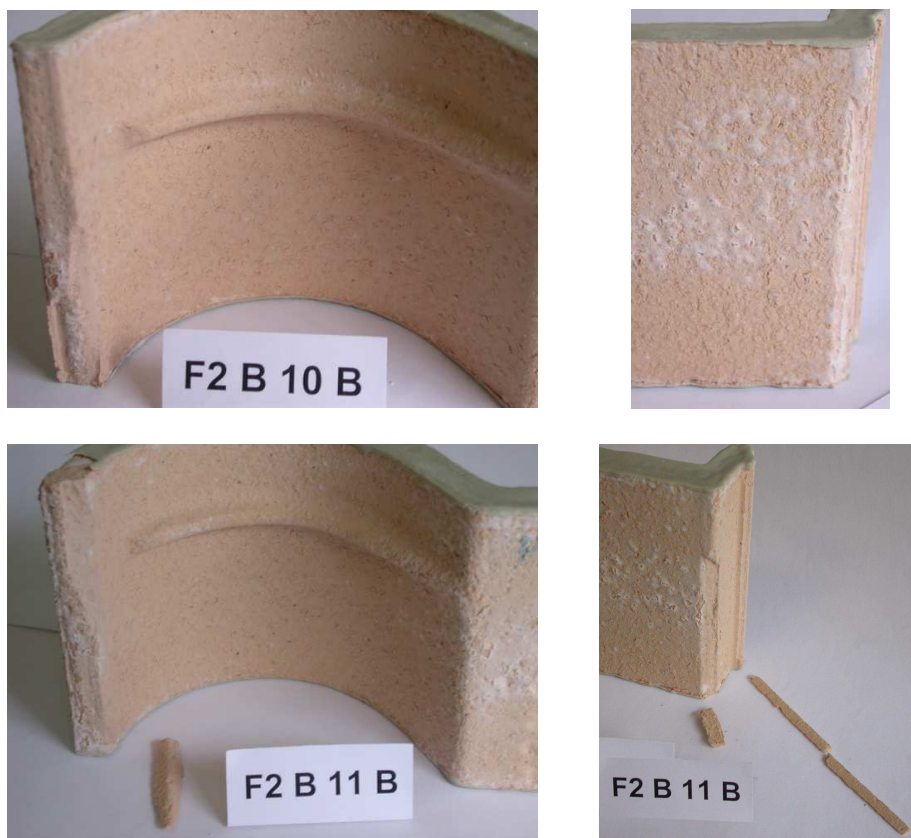


Figura 161 - Provetes F2 B 10 B e F2 B 11 B após pincelagem a seco da fase 4

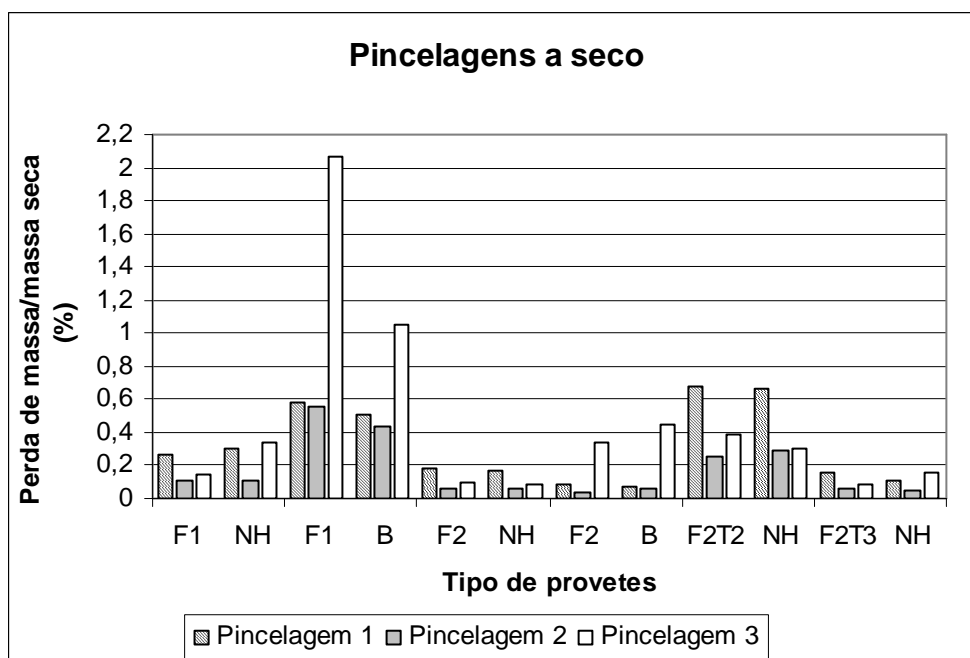


Figura 162 - Perda de massa nas pincelagens a seco em relação à massa seca

Como já foi referido, com as pincelagens a seco pretendeu-se obter um efeito similar ao do vento. A pincelagem promoveu a queda de material que se encontrava solto ou praticamente solto. Nos provetes que foram perdendo massa durante os ciclos, a perda de massa devida à pincelagem é apenas uma parte da perda total de massa dos provetes devida ao ensaio.

A relação entre a perda de massa devida à pincelagem e a massa inicial seca é, em todos os provetes, maior na terceira pincelagem do que na segunda. O que pode ter sido devido a diversos factores.

Alguns provetes atingiram níveis de degradação mais elevados na fase 4 do que na fase 3 e teriam portanto mais material destacável pela pincelagem. Também em alguns provetes a pincelagem nesta fase 4 foi mais efectiva do que na fase 3, já que após pincelagem ficou pouco ou nenhum material aderente aos provetes.

Outro factor para uma maior perda de massa dos provetes decorrente da pincelagem da fase 4 poderá estar relacionado com o estado dos provetes no início da pincelagem. Na fase 3 os provetes foram pincelados após a secagem de 16 horas do último ciclo de nevoeiro salino/secagem, enquanto na fase 4 a pincelagem ocorreu após 44 dias de secagem dos provetes. Como já foi referido esta secagem prolongada pode ter aumentado a degradação dos provetes e por outro lado também pode ter promovido que algum material da degradação ficasse mais solto do provete e mais facilmente destacável pela pincelagem.

O tipo de resíduos obtidos com a pincelagem também teve influência na perda de massa, já que o destacamento de maior quantidade de plaquetas e de lascas ou a sua maior dimensão também aumentou a massa do material perdido.

No gráfico destacam-se os provetes do tipo F1 B. Estes são os provetes que apresentaram mais degradação e cuja perda de massa relativa devida à pincelagem foi muito superior à dos outros provetes.

O maior valor da perda de massa dos provetes F2 B está relacionado com o nível superior de degradação atingido em comparação com a fase 3 e também com as lascas que se destacaram na pincelagem da fase 4, o que não aconteceu nas pincelagens anteriores.

A sequência dos tipos de provetes por ordem decrescente de perda de massa devida à pincelagem a seco 3 é a seguinte:

F1 B - F2 B - F2 T2 NH - F1 NH - F2 T3 NH - F2 NH

Face à sequência na pincelagem a seco 2, as diferenças são a passagem dos provetes F2 B do último para o segundo lugar e a troca de posições dos provetes F2 NH com os provetes F2 T3 NH.

Após a pincelagem 2 ficaram resíduos aderentes a todos os provetes, após a pincelagem 3 não ficou material aderente ou ficou pouco em três dos seis tipos de provetes.

Com a massa dos provetes após pincelagem foi possível obter a relação da massa dos provetes após a secagem e a pincelagem da fase 4 com a sua massa inicial seca, que se apresenta no Quadro 75.

Só após obtenção destes valores é que é possível fazer algum tipo de comparação entre a secagem dos provetes realizada na fase 3 do ensaio com a secagem desta fase 4. Na fase 3 os provetes foram sujeitos a secagem após pincelagem a seco, aspersão com água destilada e pincelagem com pincel húmido. Na fase 4 a pincelagem a seco foi realizada após a secagem dos provetes, realizada logo após a conclusão dos ciclos nevoeiro salino/secagem.

Enquanto na fase 3 a massa dos provetes estabilizou após 20 dias de secagem a 50 °C, tal só aconteceu na fase 4 após 44 dias de secagem. Esta diferença pode ser explicada por dois tipos de factores. Por um lado pode ter ocorrido uma maior acumulação de sal durante os ciclos da fase 4 do ensaio porque a superfície dos provetes estava mais exposta nesta fase devido à aspersão e pincelagem realizada na fase 3 do ensaio. Por outro lado, devido aos provetes terem sido pincelados e molhados antes da secagem da fase 3, estariam menos

contaminados com sal durante a secagem da fase 3 do que durante a secagem da fase 4, em que só foram pincelados depois da secagem.

Como se verificou nos ensaios iniciais a secagem de provetes contaminados com sal é muito mais lenta do que a de provetes não contaminados, é expectável que quanto maior for essa contaminação mais lenta será a secagem.

Quadro 75 - Variação de massa dos provetes decorrentes das secagens das fases 3 e 4

Provetes	Absorção de água por imersão [%]	Variação de massa em relação à massa seca inicial [%]								
		Secagem da fase 3			Secagem da fase 4					Após pin- cela- gem
		20 dias			44 dias					
		Dias de secagem			Dias de secagem					
		0	10	20	0	10	20	30	44	
F1 NH 5 D	9,2	10,7	5,0	3,2	9,1	6,8	4,5	3,1	2,7	2,6
F1 NH 9 D	9,2	10,9	5,7	3,5	9,1	4,7	2,9	2,9	2,9	2,5
F1 B 6 D	9,1	9,2	2,8	2,2	7,7	5,6	3,8	2,5	1,8	-0,24
F1 B 17 D	9,2	9,1	3,4	1,8	7,3	4,7	2,2	1,4	1,3	0,29
F2 NH 4 B	5,9	5,8	1,9	1,4	5,6	3,1	2,0	1,9	1,9	1,8
F2 NH 5 B	5,9	6,1	2,4	1,7	6,0	3,3	2,2	2,1	2,1	2,0
F2 B10 B	6,8	7,5	3,1	1,8	7,1	5,5	3,9	2,7	2,2	1,8
F2 B 11 B	6,8	7,7	2,9	2,0	7,3	5,4	3,7	2,6	2,3	1,8
F2T2NH10B	8,2	8,4	2,3	1,6	6,4	4,2	2,4	1,5	0,79	0,39
F2T2NH11B	8,2	7,6	1,6	0,9	6,1	4,5	2,3	1,3	0,58	0,27
F2T3 NH 3B	5,7	6,2	2,3	1,8	5,6	2,8	2,2	2,2	2,2	2,1
F2T3 NH 4B	5,7	6,2	2,4	1,8	5,9	2,8	2,1	2,1	2,1	1,9

No início da secagem da fase 4 todos os provetes tinham massa inferior à do início da secagem da fase 3. Nos provetes dos tipos F1 NH, F1 B e F2 T2 NH, a relação entre a massa dos provetes no início da secagem da fase 4 e a sua massa seca inicial era 1,5 % a 2 % inferior à relação entre a massa no início da secagem da fase 3 e a sua massa inicial seca. A massa no início da secagem da fase 4 dos provetes dos tipos F2 NH, F2 B e F2 T3 NH também era inferior à sua massa no início da secagem da fase 3, mas mais próxima, pois a diferença entre aquelas relações variava entre 0,1 % e 0,6 %. Estes são os provetes em que a degradação de âmbito generalizado foi menor, perderam menos material cerâmico ao longo do ensaio e não chegaram a ter à superfície camadas espessas de sal cristalizado.

Após 20 dias de secagem da fase 4 a massa de todos os provetes menos um era superior à sua massa após 20 dias da fase 3, o que quer dizer que a secagem da fase 3 foi mais eficaz, de tal modo que ao fim de 20 dias de secagem da fase 3 a massa dos provetes já estava estabilizada.

Ao fim de 40 dias de secagem da fase 4, altura em que a massa dos provetes já estabilizara, seis dos provetes tinham massa superior à massa no fim da secagem da fase 3. Após pincelagem, os provetes dos tipos F2 NH e F2 T3 NH ainda tinham massa superior à sua massa no fim da fase 3. Foram estes os provetes que aumentaram de massa em consequência dos 15 ciclos de nevoeiro da fase 4 e do balanço final dos ganhos e perdas de massa ocorridos nesta fase.

Nas figuras seguintes apresentam-se as variações de massa dos provetes durante as secagens de cada uma das quatro fases do ensaio composto. Também estão representadas as variações de massa decorrentes das pincelagens a seco e da molhagem e pincelagem a húmido dos provetes.

Na Figura 163 apresenta-se o gráfico de todos os tipos de provetes, para se ter uma visão global do comportamento dos provetes ao longo do ensaio.

Na Figura 164 apresenta-se os gráficos dos provetes mais degradados e na Figura 165 os gráficos dos provetes menos degradados. Esta divisão tem que ver com o nível de degradação de âmbito generalizado atingido pelos provetes.

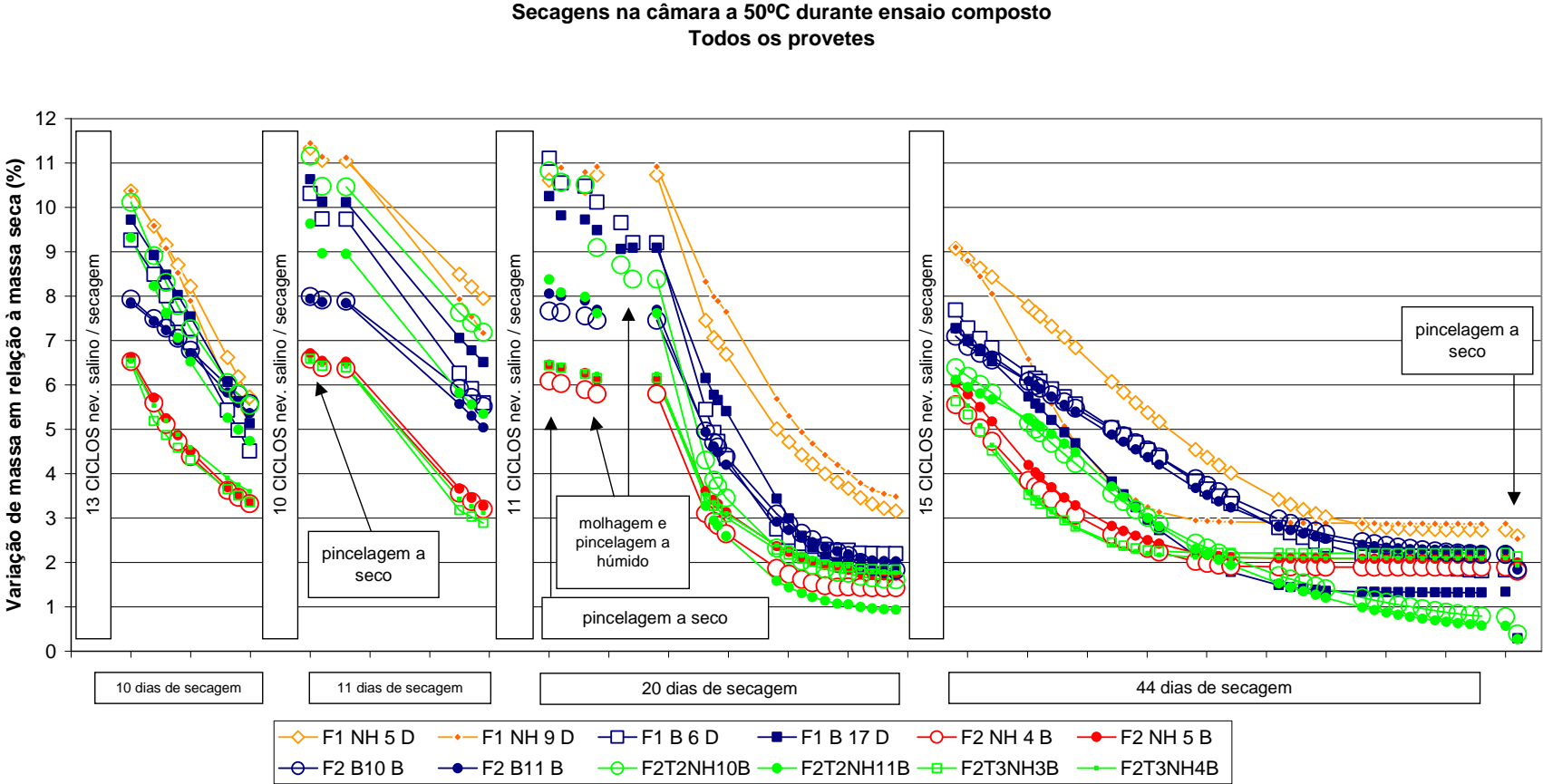


Figura 163 - Secagens na câmara durante ensaio composto - todos os provetes

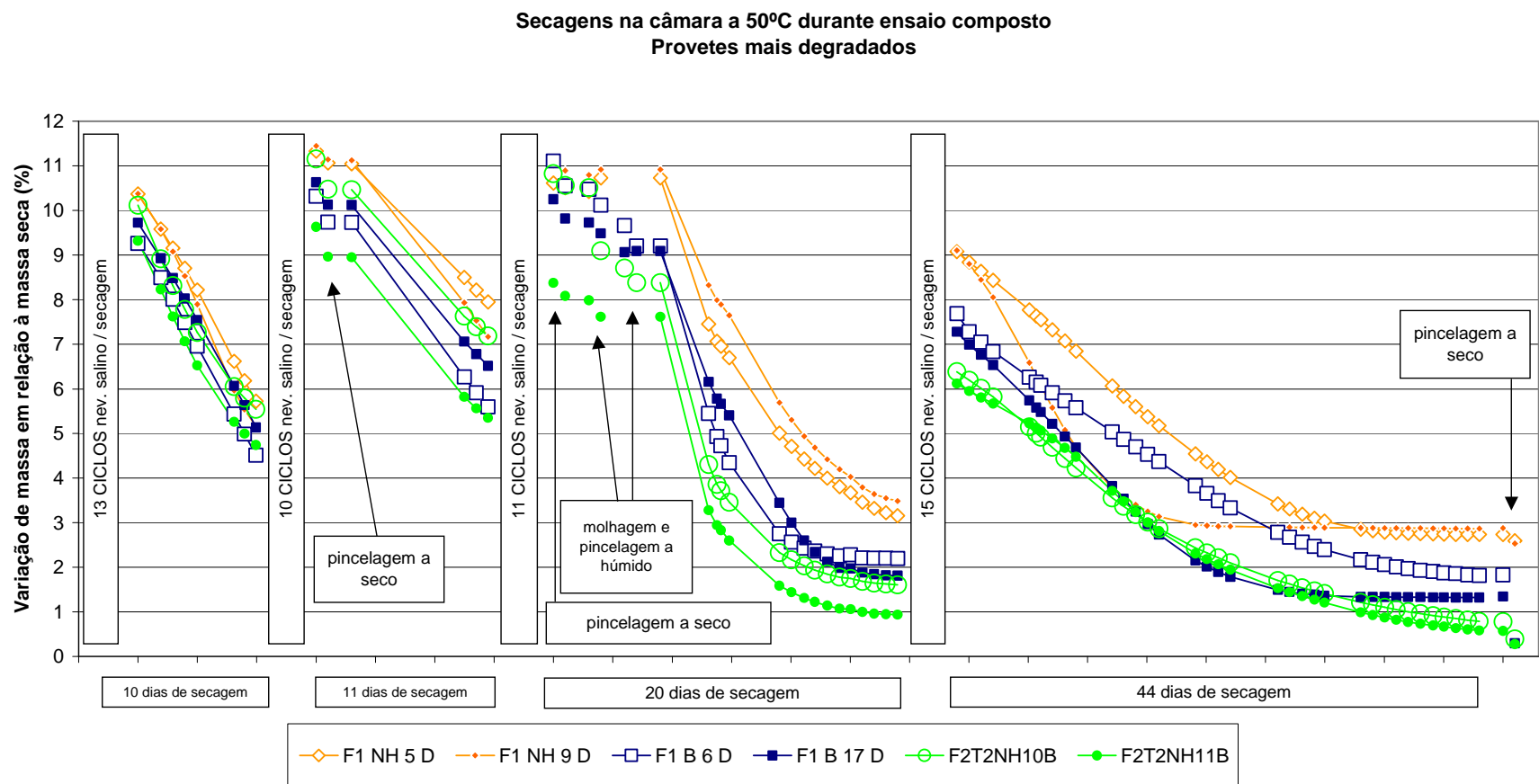


Figura 164 - Secagens na câmara durante ensaio composto - provetes mais degradados

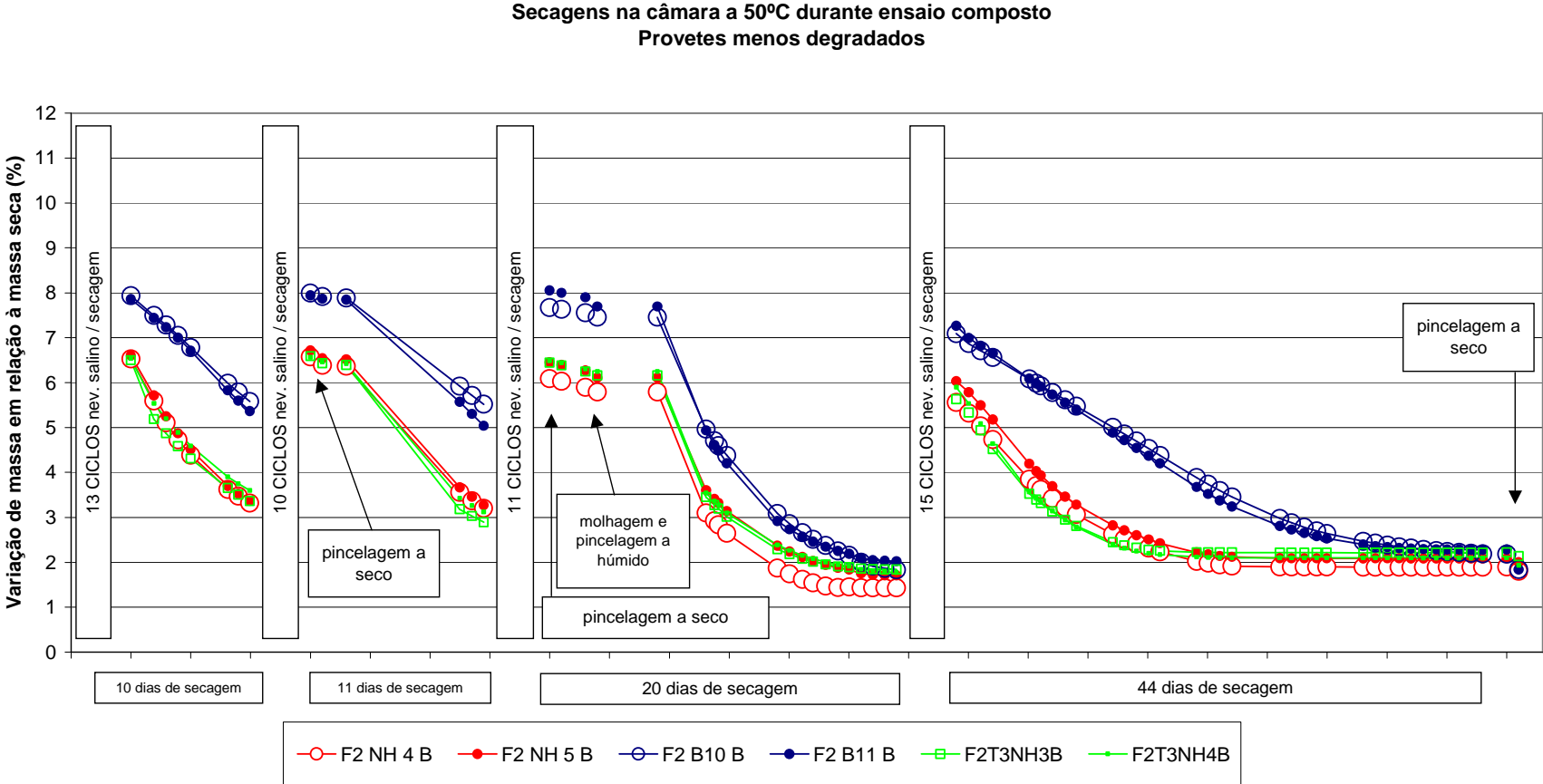


Figura 165 - Secagens na câmara durante ensaio composto - provetes menos degradados

Depois do ensaio composto na câmara de nevoeiro salino, em que os provetes estavam no estado de secos na câmara de nevoeiro salino à temperatura de 50° C, os provetes foram colocados a secar numa estufa não ventilada à temperatura de 60 °C, para se poder comparar com a sua massa seca inicial, obtida após secagem a 60 °C numa estufa ventilada. As massas secas iniciais e finais e a variação de massa são apresentadas no Quadro 76.

A massa seca final corresponde à massa do material cerâmico dos provetes que resistiu ao ensaio composto mais a massa do sal que foi contaminando os provetes e que não foi perdido nas operações realizadas durante o ensaio.

Quadro 76 - Variação de massa dos provetes decorrente do ensaio composto

Provetes	Massa seca inicial	Massa seca no final do ensaio composto	Variação de massa em relação à massa seca inicial [%]
F1 NH 5 D	874,01	895,56	2,47
F1 NH 9 D	881,50	902,85	2,42
F1 B 6 D	788,50	785,27	-0,41
F1 B 17 D	781,48	782,81	0,17
F2 NH 4 B	725,57	738,29	1,75
F2 NH 5 B	721,86	735,95	1,95
F2 B 10 B	667,27	678,76	1,72
F2 B 11 B	679,66	691,56	1,75
F2 T2 NH 10 B	740,36	741,68	0,18
F2 T2 NH 11 B	747,01	747,08	0,01
F2 T3 NH 3 B	778,19	794,52	2,10
F2 T3 NH 4 B	786,97	801,81	1,89

O provete F1 B 6 D apresenta uma massa no final do ensaio que é inferior à sua massa no início do ensaio, apesar de estar contaminado com sal. Este provete sofreu de certeza uma efectiva perda de massa durante o ensaio. O provete F1 B 17 D e os dois do tipo F2 T2 NH têm uma massa muito próxima da inicial, menos de 0,2 % superior. Estes são os provetes onde se observou maior degradação e maior perda de material cerâmico no decorrer do ensaio composto.

Os provetes F1 NH estão também dentro do grupo dos três tipos em que se observou maior degradação de âmbito generalizado. Este apresentam uma massa final 2,5 % superior à inicial, que se ficará a dever à contaminação com sal.

Os provetes do grupo que apresentou menos degradação de âmbito generalizado, designadamente dos tipos F2 NH, F2 B e F2 T3 NH, apresentam uma massa final 1,7 % a 2,1 % superior à massa seca inicial.

5.4.5.6 Conclusões relativas ao ensaio composto de envelhecimento acelerado

O aumento da temperatura de funcionamento da câmara de nevoeiro salino de 35 °C no ensaio cíclico para 50 °C no ensaio composto promoveu maior degradação na maior parte dos tipos de provetes face à sofrida nos ensaios cíclicos.

A degradação deixou aparentemente de evoluir nos últimos ciclos de nevoeiro salino/secagem das várias fases do ensaio composto, tal como tinha acontecido nos últimos ciclos dos ensaios cíclicos. A introdução de um período intermédio de secagem prolongada e contínua permitiu diminuir o nível de humedecimento dos provetes. Em serviço os telhados também estão sujeitos a períodos prolongados de secagem.

Nas fases 1 e 2 a única operação que decorreu entre os ciclos nevoeiro salino/secagem destas duas fases do ensaio foi a secagem prolongada. Tendo a degradação aparentemente parado de evoluir nos últimos ciclos da fase 1, foi visível que voltou a progredir na maior parte dos provetes durante os ciclos da fase 2, ficando assim justificada a validade da operação de secagem prolongada.

Com as operações de pincelagem a seco pretendeu-se obter um efeito similar ao do vento, promovendo a queda de material que se encontrava solto ou quase solto.

Com as operações de aspersão com água desmineralizada e pincelagem com pincel húmido pretendeu-se obter um efeito similar ao provocado pela chuva e vento nos telhados. Estas operações promoveram a lavagem das superfícies, retirando o material decorrente da

degradação que estava fixado aos provetes pelos cristais de sal e também se procurou dissolver e remover as camadas de sal que alguns provetes apresentavam.

Com o decorrer das fases do ensaio o material degradado foi caindo ou retirado por pincelagem e molhagem, tendo ficado exposta a superfície degradada. Submetida esta superfície degradada a mais ciclos de nevoeiro salino/secagem, a degradação resultante manifestou-se através de material de menor dimensão.

Observou-se assim uma diferença de comportamento, face ao envelhecimento por ciclos de nevoeiro salino/secagem, entre a superfície nova dos provetes e a superfície dos provetes já degradados. Esta diferença pode estar relacionada com propriedades diferentes da superfície e do interior das telhas.

Também pode influenciar nesta diferença de comportamento o diferente estado de secagem que os provetes apresentavam no início do ensaio e no início dos ciclos das fases intermédias. De notar que antes dos ciclos da última fase do ensaio os provetes permaneceram na câmara de nevoeiro salino durante 20 dias para atingirem o estado de secagem a 50 °C, que se considerou que foi atingido. Antes do ensaio os provetes tinham estado a secar em estufa ventilada, à temperatura de 60 °C.

Com o decorrer do ensaio começou a aparecer, em provetes de diversos tipos, degradação de âmbito localizado sob a forma de fissuras. As fissuras foram abrindo e deram origem a fracturas e a lascagem. Estes fenómenos aconteceram principalmente em descontinuidades da superfície dos provetes resultantes do processo de prensagem. Estas descontinuidades são designadas por dobras, vincos ou rugas da superfície das telhas.

O processo de formação de fissuras que originam fracturas e lascagem origina a queda de material de maiores dimensões do que os tipos de degradações de âmbito generalizado e pode ter consequências mais gravosas no desempenho em serviço das telhas. Estes tipos de degradação mais graves não são apenas superficiais, podendo afectar toda a espessura das telhas e levar à queda de fragmentos que podem afectar a sua estanquidade em serviço.

A ocorrência de degradação de âmbito localizado, em zonas singulares dos provetes, evidencia a necessidade de ensaiar telhas inteiras ou provetes retirados delas que sejam representativos da resistência das telhas ao nevoeiro salino. Assim, é aconselhável que os provetes sejam constituídos por uma faixa transversal da telha, que inclua toda a sua largura de modo a conter as referidas descontinuidades da superfície.

A análise visual dos provetes F2 B no ensaio composto evidenciou uma degradação de âmbito global inferior à observada nos ensaios cíclicos nos provetes das mesmas telhas, no entanto estes provetes foram afectados pela perda de material devido à formação de fissuras - fracturas - lascagem nas zonas correspondentes às juntas dos moldes. Portanto estes tipos de provetes sofreram no ensaio composto, para além de tipos de degradações generalizadas idênticas às sofridas no ensaio cíclico, degradações de outros tipos, de âmbito localizado e mais gravosas. A degradação de âmbito generalizado provocada nestes provetes do tipo F2 B pelos ciclos de nevoeiro salino/secagem da fase 4 do ensaio foi superior à degradação de âmbito generalizado provocada pelos ciclos das fases anteriores do ensaio.

A continuação dos ciclos e da degradação também permitiu o aparecimento nos provetes F1 B de degradação do tipo folheado ou esfoliação lamelar. O folheado é uma esfoliação lamelar que pode conduzir a uma desagregação do corpo cerâmico numa sucessão de planos paralelos [14]. A esfoliação é uma perda progressiva de material atingindo toda ou parte da espessura do produto [14] ou uma divisão múltipla em lâminas finas paralelas entre si [13].

Portanto no ensaio composto obtiveram-se degradações dos tipos das obtidas nos ensaios cíclicos, em muitos casos atingindo um nível de degradação superior, e também degradações de outros tipos mais gravosos. Para isso terá contribuído o aumento da temperatura de funcionamento da câmara climática de nevoeiro salino e o aumento do número de ciclos de nevoeiro salino/secagem.

Para que a degradação continuasse a evoluir ao longo de todo o ensaio, também terá contribuído a introdução de períodos prolongados de secagem e as operações de

pincelagem a seco dos provetes e a sua lavagem através da aspersão e pincelagem com pincel húmido. Estas operações tentam reproduzir os efeitos de eventos naturais como o vento, a chuva e períodos prolongados de seca.

5.5 Análise visual da degradação provocada pelo ensaio cíclico e pelo ensaio composto de envelhecimento acelerado

Na Figura 166 e na Figura 167 apresentam-se lado a lado aspectos da degradação dos provetes do fabricante 1 e do fabricante 2 decorrentes dos ensaios de envelhecimento acelerado cíclico e composto. A Figura 168 apresenta alguns aspectos da degradação de provetes dos tipos F1 B, F2 B e F2 T2 NH provocada pelo ensaio composto.

Complementando as imagens da degradação, apresenta-se no Quadro 77 e no Quadro 78 a compilação dos tipos de degradação observados no ensaio cíclico e em todas as fases do ensaio composto em cada um dos tipos de provetes. Também é feita a apreciação global da degradação através duma classificação relativa do grau de degradação, que varia entre os provetes sem degradação (-) e os provetes com maior grau de degradação (+ + + +) observada em cada tipo de ensaio.

O grau de degradação é uma apreciação global do âmbito e do nível de degradação observada em cada tipo de provetes, permitindo uma classificação relativa da degradação provocada em cada tipo de provetes por cada um dos ensaios, o ensaio cíclico e o ensaio composto.

Como já foi referido, em cada tipo de ensaio, os diversos tipos de provetes evidenciaram degradações distintas resultantes da acção dos ensaios de envelhecimento acelerado. As formas de alteração e degradação observadas nos dois tipos de ensaio são dos mesmos tipos das observadas nos casos reais apresentados em 2.4.

No ensaio composto todos os provetes apresentaram maior degradação do que no ensaio cíclico. Os provetes F2 B apresentam um nível superior de picamento, desagregação granular e escamação no ensaio cíclico do que no ensaio composto, no entanto neste ensaio sofreram outros tipos de degradação localizados que são potencialmente mais gravosos.

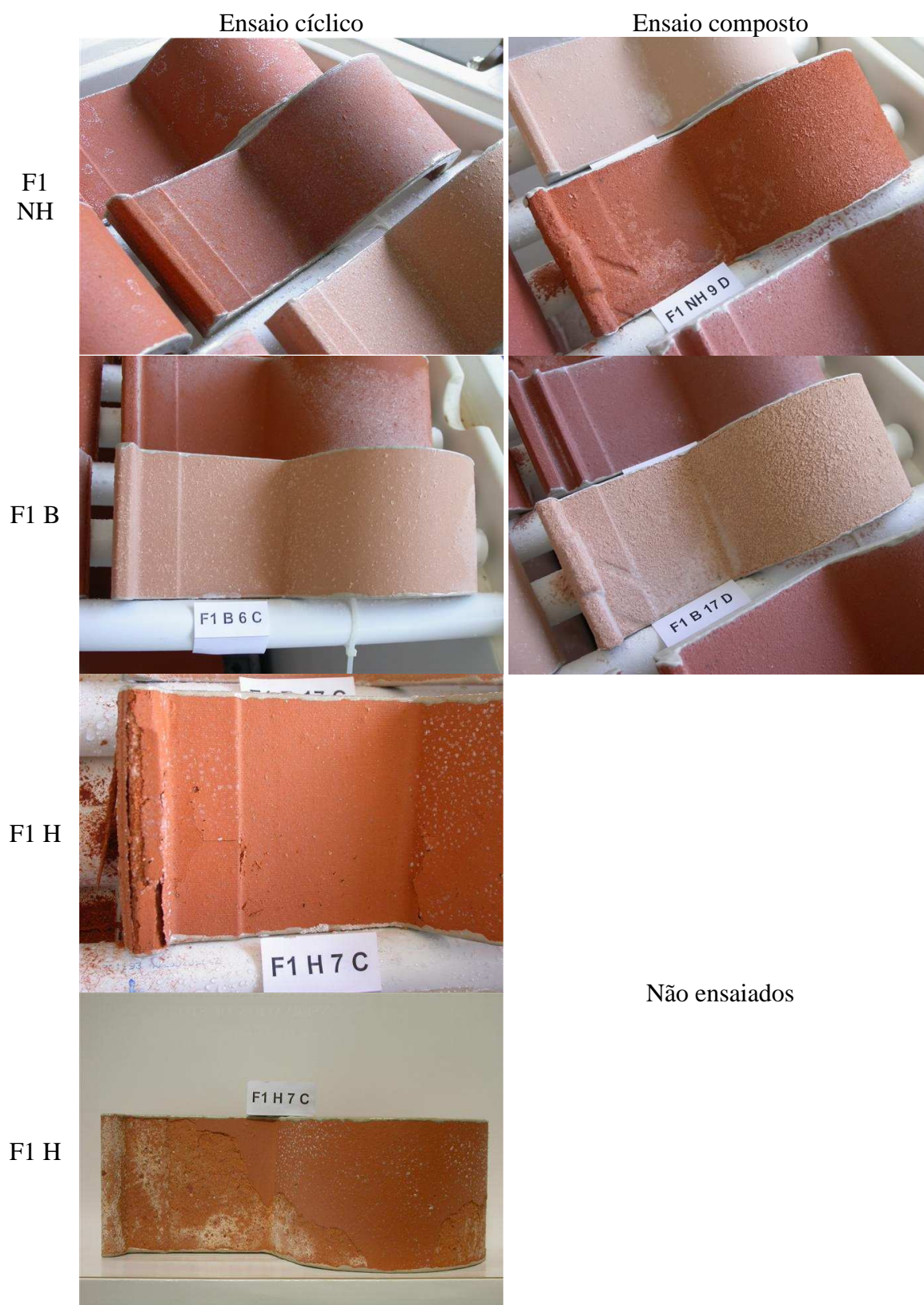


Figura 166 - Aspectos da degradação de provetes do fabricante 1 no ensaio cíclico e no ensaio composto

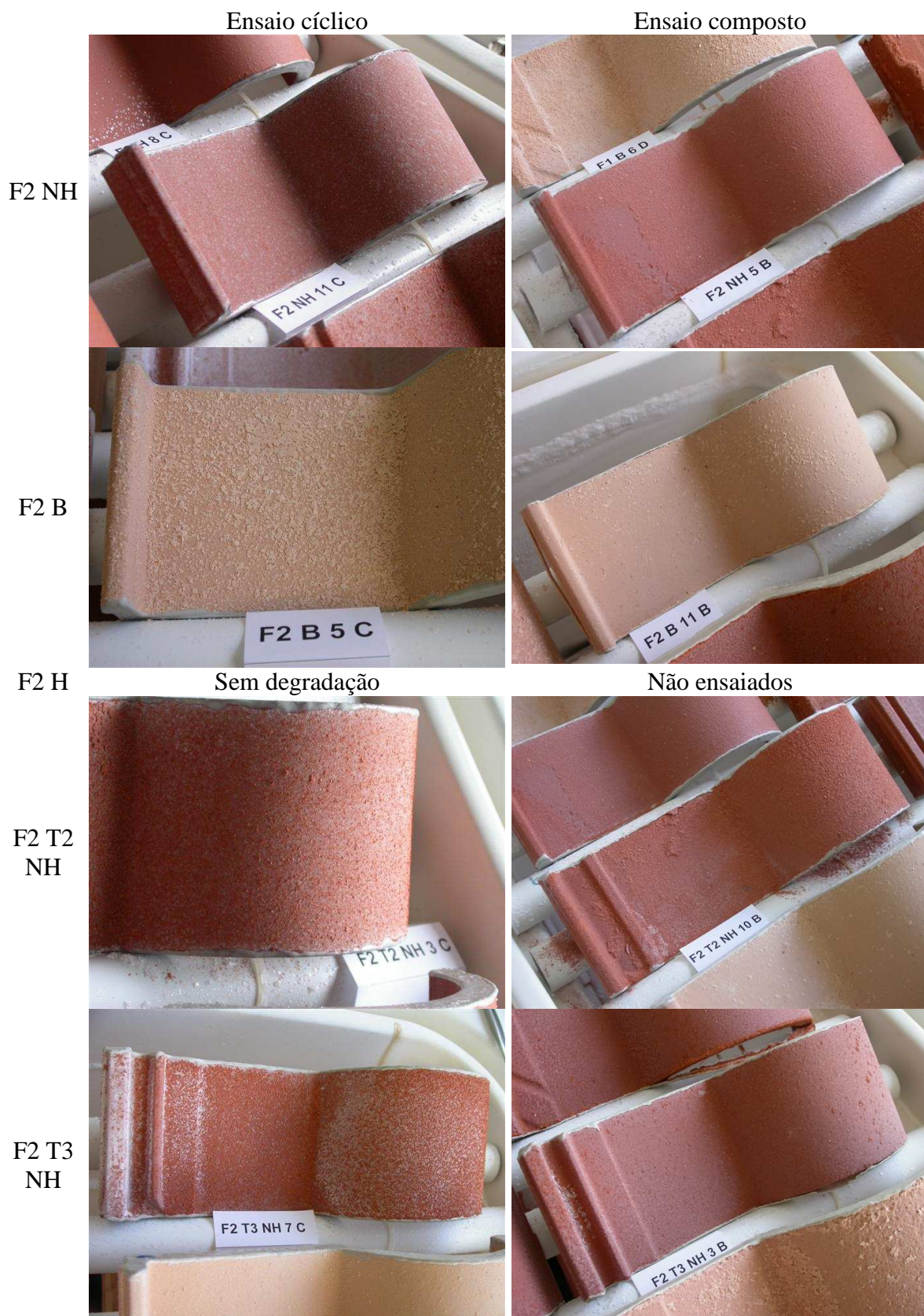


Figura 167 - Aspectos da degradação de provetes do fabricante 2 no ensaio cíclico e no ensaio composto

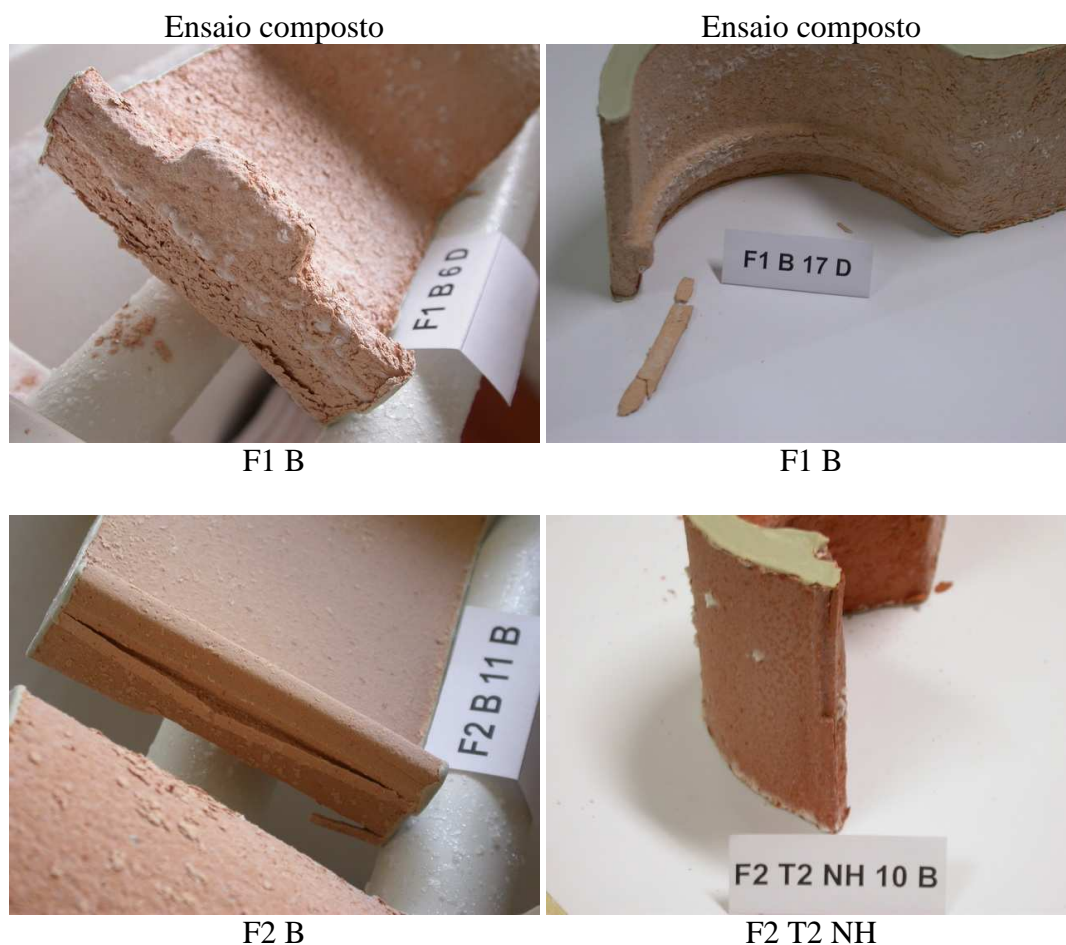


Figura 168 - Aspectos da degradação de provetes F1 B, F2 B e F2 T2 NH no ensaio composto

A sequência dos tipos de provetes por ordem do grau de degradação, dos mais para os menos degradados é, no ensaio cíclico:

F1 H - F1 B - F2 B - F2 T2 NH - F2 T3 NH - F1 NH - F2 NH - F2 H

No ensaio composto a sequência dos tipos de provetes por ordem decrescente da degradação é:

F1 B - F2 B - F2 T2 NH - F1 NH - F2 NH - F2 T3 NH

No ensaio cíclico verifica-se que do comportamento de alguns dos provetes hidrofugados do fabricante 1 (F1 H) resultou um maior grau de degradação deste tipo de provetes em relação aos outros tipos.

Quadro 77 - Formas de alteração e degradação de provetes do fabricante 1

Tipo de provetes	Ensaio cíclico		Ensaio composto	
	Tipos de degradação	Grau de degradação relativo	Tipos de degradação	Grau de degradação relativo
F1 NH	Picamento Desagregação granular	+	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras / Fracturas / Lascagem	+++
F1 B	Picamento Desagregação granular Escamação	+++	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras / Fracturas / Lascagem Folheado ou esfoliação lamelar	++++
F1 H	Sem degradação Fissuras Empolamento Plaquetas	- ++++	Não ensaiados	Não ensaiados

Quadro 78 - Formas de alteração e degradação de provetes do fabricante 2

Tipo de provetes	Ensaio cíclico		Ensaio composto	
	Tipos de degradação	Grau de degradação relativo	Tipos de degradação	Grau de degradação relativo
F2 NH	Picamento Desagregação granular	+	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras / Fracturas / Lascagem	++
F2 B	Picamento Desagregação granular Escamação	+++	Picamento Desagregação granular Escamação Fissuras / Fracturas / Lascagem	+++
F2 H	Sem degradação	-	Não ensaiados	Não ensaiados
F2 T2 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	++	Picamento Desagregação granular Escamação Empolamento Plaquetas Fissuras / Fracturas / Lascagem	+++
F2 T3 NH	Picamento Desagregação granular Escamação	++	Picamento Desagregação granular Escamação	+

Entre os provetes não hidrofugados os brancos dos dois fabricantes (F1 B e F2B) foram os que se degradaram mais, tanto no ensaio cíclico como no composto.

Os provetes vermelhos não hidrofugados mais degradados nos dois ensaios são os do modelo 2 do fabricante 2 (F2 T2 NH). Quanto aos restantes provetes vermelhos não hidrofugados, os provetes do modelo 3 do fabricante 2 (F2 T3 NH) degradaram-se mais no ensaio cíclico, enquanto no ensaio composto os provetes que apresentaram maior degradação foram os provetes vermelhos do fabricante 1 (F1 NH) e os provetes vermelhos do modelo 1 do fabricante 2 (F2 NH).

A sequência dos tipos de provetes não hidrofugados por ordem decrescente da degradação observada no ensaio cíclico é idêntica à sequência no ensaio composto, com a excepção dos provetes F2 T3 NH. No ensaio cíclico os provetes F2 T3 NH degradaram-se aparentemente mais do que F1 NH e F2 NH devido à formação de escamas, no entanto o nível de degradação foi baixo nos três tipos de provetes.

Como no ensaio composto foram atingidas maiores degradações, foi possível observar maiores diferenças de comportamento entre os diversos tipos de provetes não hidrofugados, tendo sido os provetes F2 T3 NH os que se degradaram menos. Pode-se assim considerar que os provetes F2 T3 NH foram os que melhor se comportaram sob o efeito dos ensaios de envelhecimento acelerado.

Pode-se portanto considerar a seguinte sequência de tipos de provetes não hidrofugados segundo a sua susceptibilidade decrescente ao ensaio de envelhecimento acelerado de nevoeiro salino:

F1 B - F2 B - F2 T2 NH - F1 NH - F2 NH - F2 T3 NH

Comparando esta sequência de degradação com as sequências dos tipos de provetes segundo as suas características, apresentadas no Quadro 43, é possível detectar diversas relações.

Os provetes menos degradados (F2 NH e F2 T3 NH) são os que têm menores absorção de água por imersão, absorção de água sob vácuo e porosidade aberta e têm maior massa volúmica aparente.

No conjunto dos provetes vermelhos do fabricante 2 a sequência decrescente de degradação (F2 T2 NH - F2 NH - F2 T3 NH) corresponde à sequência decrescente de absorções de água e porosidade aberta e à sequência crescente de massa volúmica.

Os provetes brancos foram os que mais se degradaram, apesar de não serem os que têm maior absorção de água por imersão. No entanto é de notar que em cada fabricante os provetes brancos são os que apresentam maior absorção de água sob vácuo, maior porosidade aberta e menor massa volúmica aparente.

Assim, as telhas mais duráveis podem ser as telhas com menor absorção de água sob vácuo, menor porosidade e maior massa volúmica aparente e não as telhas com menor absorção de água por imersão.

A porosimetria de mercúrio detectou uma estrutura bimodal no provete F1 B ensaiado, o que não acontece nas telhas vermelhas ensaiadas. A estrutura bimodal também pode influenciar a durabilidade face ao nevoeiro salino, já que os poros maiores podem servir de depósito à solução salina, acontecendo a cristalização de sais e a degradação nos poros menores.

Os provetes F1 B e F2 T2 NH, com maior intervalo de dimensões de poros, foram aqueles que sofreram maior degradação. Os provetes F1 NH e F2 NH, com poros maiores e com intervalo menor e mais homogêneo de dimensões de poros, apresentaram menor grau de degradação.

5.6 Caracterização de provetes após ensaio cíclico de envelhecimento acelerado

Após a realização do ensaio cíclico os provetes foram sujeitos a diversos ensaios para avaliar as consequências do envelhecimento acelerado nas suas características, por comparação com os resultados obtidos nos ensaios sobre os provetes novos.

5.6.1 Preparação dos provetes

Após o ensaio acelerado os provetes foram secos em estufa a 60 °C para determinação da velocidade de transmissão de ultra-sons nas mesmas condições de secagem dos provetes novos. Também foram pesados para comparação com a massa inicial.

A seguir os provetes foram dessalinizados através da imersão em água destilada renovada periodicamente (Figura 169). Foi medida a condutividade da água antes da imersão e após vários dias de imersão dos provetes para determinar se ainda estavam a ser retirados sais dos provetes. Após várias renovações de água o processo terminou quando se considerava que o aumento da condutividade da água já não era significativo.

Depois de dessalinizados os provetes foram novamente secos a 60 °C em estufa ventilada.



Figura 169 - Dessalinização de provetes sujeitos a nevoeiro salino

5.6.2 Variação de massa

No Quadro 79 são apresentadas as variações de massa dos provetes do fabricante 1 em percentagem da massa inicial.

Quadro 79 - Variações de massa dos provetes do fabricante 1

Número de ciclos	Tipo de provetes	Variação de massa [%]	
		Antes dessalinização	Após dessalinização
10	F1 NH 6 C	+2,18	-0,10
20	F1 NH 14C	+2,58	-0,05
30	F1 NH 5 C	+2,52	-0,18
	F1 NH 9 C	+2,58	-0,09
	F1 NH 10C	+2,75	-0,10
10	F1 B 9 C	+1,93	-0,30
20	F1 B 13 C	+2,51	-0,31
30	F1 B 6 C	+2,54	-0,31
	F1 B 7 C	+2,68	-0,34
	F1 B 17C	+2,53	-0,25
10	F1 H 6 C	+0,09	+0,07
20	F1 H 3 C	+0,15	-0,89
30	F1 H 5 C	+0,34	+0,14
	F1 H 7 C	-0,75	-3,53
	F1 H 8 C	+0,29	+0,13

No Quadro 80 são apresentadas as variações de massa dos provetes do fabricante 2 em percentagem da massa inicial.

Em praticamente todos os provetes verifica-se que a massa antes da dessalinização é superior à massa dos provetes novos. Este aumento decorre da absorção da solução salina durante o nevoeiro e da acumulação de sal nos provetes quando da evaporação da água durante a secagem.

Quadro 80 - Variações de massa dos provetes do fabricante 2

Número de ciclos	Tipo de provetes	Variação de massa [%]	
		Antes dessalinização	Após dessalinização
10	F2 NH 8 C	+1,82	+0,03
20	F2 NH 9 C	+1,79	+0,11
30	F2 NH 4 C	+1,76	+0,09
	F2 NH 5 C	+1,85	+0,11
	F2 NH 11 C	+2,00	+0,12
10	F2 B 7 C	+0,88	-0,22
	F2 B 8 C	+0,82	-0,22
20	F2 B 6 C	+1,96	-0,08
	F2 B 9 C	+1,96	-0,02
30	F2 B 4 C	---	---
	F2 B 5 C	+1,49	-0,58
	F2 B 10 C	+1,66	-0,32
	F2 B 11 C	+1,74	-0,28
10	F2 H 7 C	+0,08	+0,07
20	F2 H 5 C	+0,06	+0,04
30	F2 H 3 C	+0,09	+0,06
	F2 H 6 C	+0,10	+0,07
	F2 H 8 C	+0,08	+0,05
10	F2 T2 NH 5C	+2,08	-0,05
20	F2 T2 NH 3C	+2,30	0,00
30	F2 T2 NH 6 C	+2,30	+0,02
	F2 T2 NH10 C	+2,33	+0,07
	F2 T2 NH 11 C	+2,33	+0,06
10	F2 T3 NH 8 C	+0,94	0,00
	F2 T3 NH 10 C	+0,89	+0,01
20	F2 T3 NH 11 C	+1,57	+0,06
	F2 T3 NH 12 C	+1,55	+0,07
30	F2 T3 NH 3 C	+1,42	+0,01
	F2 T3 NH 4 C	+1,51	+0,01
	F2 T3 NH 6 C	+1,57	-0,10
	F2 T3 NH 7 C	---	---

Nos provetes F1 NH e F1 B do fabricante 1 quanto maior é o número de ciclos a que foram sujeitos maior é o aumento de massa dos provetes antes da dessalinização.

No caso dos provetes hidrofugados deste fabricante (F1 H) o provete sujeito a 10 ciclos manteve praticamente a sua massa. Entre os provetes sujeitos a 30 ciclos a massa dos que aparentemente não se degradaram aumentou mais do que a massa do provete sujeito a 20 ciclos, que se degradou. O provete mais degradado foi sujeito a 30 ciclos e perdeu massa, o que significa que ao fim deste número de ciclos a massa do material perdido já era superior à massa do sal acumulado.

A variação de massa dos provetes F2 NH do fabricante 2 antes da dessalinização não variou muito com o aumento do número de ciclos.

No caso dos provetes F2 B a massa dos provetes sujeitos a 20 ciclos aumentou mais do que a massa dos provetes sujeitos a 10 ciclos, no entanto a massa dos provetes sujeitos a 30 ciclos aumentou menos do que a dos sujeitos a 20 ciclos. Isto foi devido à perda de massa dos provetes sujeitos a 30 ciclos por causa da degradação.

Os provetes F2 T2 NH foram os que aumentaram mais de massa entre os do fabricante 2 e os provetes F2 T3 NH apresentaram o menor aumento de massa antes da dessalinização.

Os provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H) mantiveram praticamente a sua massa. Como aparentemente não sofreram degradação e portanto não perderam massa por esta via, quer dizer que também não ganharam massa por acumulação de sal. Portanto não terão absorvido a solução salina durante o ensaio, o que confirma a eficácia da sua hidrofugação.

Após dessalinização as variações de massa são, de um modo geral, muito reduzidas ou nulas, não quantificando a degradação observada. No entanto nos provetes brancos de ambos os fabricantes e em alguns provetes hidrofugados do fabricante 1, casos em que a degradação foi maior, a perda de massa já tem alguma expressão.

Os provetes hidrofugados do fabricante 1 que mais se degradaram e que perderam massa apresentavam maior absorção de água quando novos, o que quer dizer que antes do ensaio tinham algum tipo de deficiência da sua hidrofugação em comparação com os restantes do mesmo tipo.

5.6.3 Absorção de água fria por imersão

Após dessalinização e secagem dos provetes foi determinada a sua absorção de água fria obtida de acordo com o especificado no Anexo A da NP EN 539-2 [14], com a diferença de que a imersão gradual começou a ½ altura do provete e passada uma hora o nível foi elevado para (20 ± 5) mm acima dos provetes. Os provetes permaneceram submersos durante mais 48 horas, após o que foram retirados da água, foi removida a água superficial e foram pesados. A absorção de água foi obtida a partir da massa seca (m_{tr}) e da massa húmida ($m_{n,u}$) usando a fórmula:

$$W_u = (m_{n,u} - m_{tr}) \times 100 / m_{tr} \quad [\%]$$

No Quadro 81 e na Figura 170 são apresentadas as absorções de água dos provetes do fabricante 1, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino.

Quadro 81 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento

Número de ciclos	Provetes	Absorção de água fria por imersão W_u [%]	
		Antes dos ciclos de nevoeiro salino/secagem	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem
10	F1 NH 6 C	9,3	9,2
20	F1 NH 14 C	9,4	9,3
30	F1 NH 5 C	9,2	9,2
	F1 NH 9 C	9,2	9,1
	F1 NH 10 C	10,1	10,0
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 NH	9,5	9,4
Média de 5 provetes	F1 NH	9,4	9,4
10	F1 B 9 C	9,9	9,8
20	F1 B 13 C	9,0	9,0
30	F1 B 6 C	9,1	9,1
	F1 B 7 C	9,6	9,6
	F1 B 17 C	9,2	9,1
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 B	9,3	9,3
Média de 5 provetes	F1 B	9,4	9,3
10	F1 H 6 C	3,9	3,0
20	F1 H 3 C	8,7	10,7
30	F1 H 5 C	4,2	9,1
	F1 H 7 C	6,2	10,0
	F1 H 8 C	4,3	8,9
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 H	4,9	9,3
Média de 5 provetes	F1 H	5,5	8,3

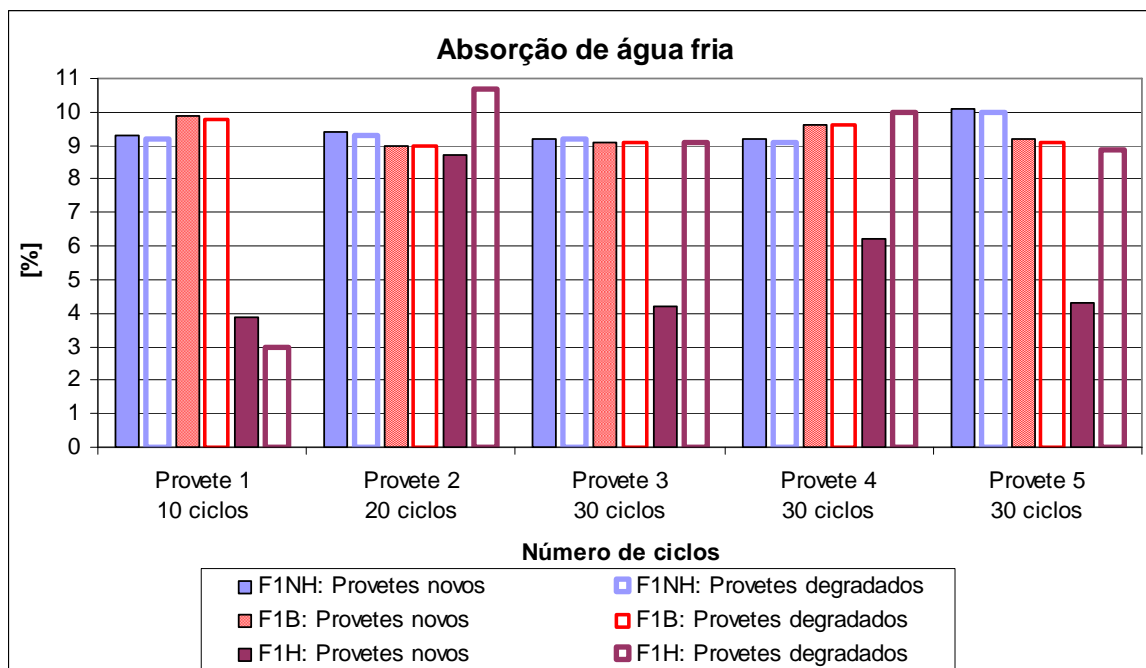


Figura 170 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento

Os provetes hidrofugados do fabricante 1 (F1 H) apresentaram um aumento significativo da absorção de água, com excepção do provete sujeito a 10 ciclos. Portanto o hidrofugante desse provete manteve a sua eficácia durante os 10 ciclos de ensaio. Nos restantes provetes o hidrofugante terá perdido eficácia no decorrer dos 20 ciclos e dos 30 ciclos. A absorção de água destes provetes atingiu os níveis de absorção de água dos provetes não hidrofugados do mesmo fabricante.

Para os restantes tipos de provetes do fabricante 1 o nível de degradação atingido ao fim de 30 ciclos, mesmo que detectável visualmente, ainda não é suficiente para ser quantificável através de alterações do valor da absorção de água.

No Quadro 82 e no Quadro 83 são apresentadas as absorções de água dos provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino.

Quadro 82 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2 antes e após envelhecimento

Número de ciclos	Provetes	Absorção de água fria por imersão W_u [%]	
		Antes dos ciclos de nevoeiro salino/secagem	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem
10	F2 NH 8 C	5,8	5,8
20	F2 NH 9 C	5,8	5,9
30	F2 NH 4 C	5,9	5,9
	F2 NH 5 C	5,9	5,9
	F2 NH 11 C	6,5	6,5
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 NH	6,1	6,1
Média de 5 provetes	F2 NH	6,0	6,0
10	F2 B 7 C	7,3	7,3
	F2 B 8 C	7,3	7,3
20	F2 B 6 C	7,3	7,3
	F2 B 9 C	6,8	6,8
30	F2 B 5 C	7,2	7,3
	F2 B 10 C	6,8	6,8
	F2 B 11 C	6,8	6,8
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 B	6,9	7,0
Média de 7 provetes	F2 B	7,1	7,1
10	F2 H 7 C	0,6	0,2
20	F2 H 5 C	0,6	0,4
30	F2 H 3 C	0,6	0,5
	F2 H 6 C	1,2	0,6
	F2 H 8 C	0,4	0,3
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 H	0,7	0,5
Média de 5 provetes	F2 H	0,7	0,4

Quadro 83 - Absorção de água fria dos provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento

Número de ciclos	Provetes	Absorção de água fria por imersão W_u [%]	
		Antes dos ciclos de nevoeiro salino/secagem	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem
10	F2 T2 NH 5 C	8,2	8,2
20	F2 T2 NH 3 C	8,3	8,3
30	F2 T2 NH 6 C	8,3	8,3
	F2 T2 NH 10 C	8,2	8,2
	F2 T2 NH 11 C	8,2	8,1
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T2 NH	8,2	8,2
Média de 5 provetes	F2 T2 NH	8,2	8,2
10	F2 T3 NH 8 C	6,0	5,8
	F2 T3 NH 10 C	5,9	5,7
20	F2 T3 NH 11 C	6,1	5,9
	F2 T3 NH 12 C	5,8	5,7
30	F2 T3 NH 3 C	5,7	5,6
	F2 T3 NH 4 C	5,7	5,6
	F2 T3 NH 6 C	6,1	6,0
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T3 NH	5,8	5,7
Média de 7 provetes	F2 T3 NH	5,9	5,8

Na Figura 171 são apresentados graficamente os valores da absorção de água, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado, dos três tipos de provetes do fabricante 2 de que foram ensaiados cinco provetes e na Figura 172 os valores da absorção de água dos dois tipos de provetes de que foram ensaiados sete provetes. A Figura 173 apresenta o gráfico global da absorção de água de todos os provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado.

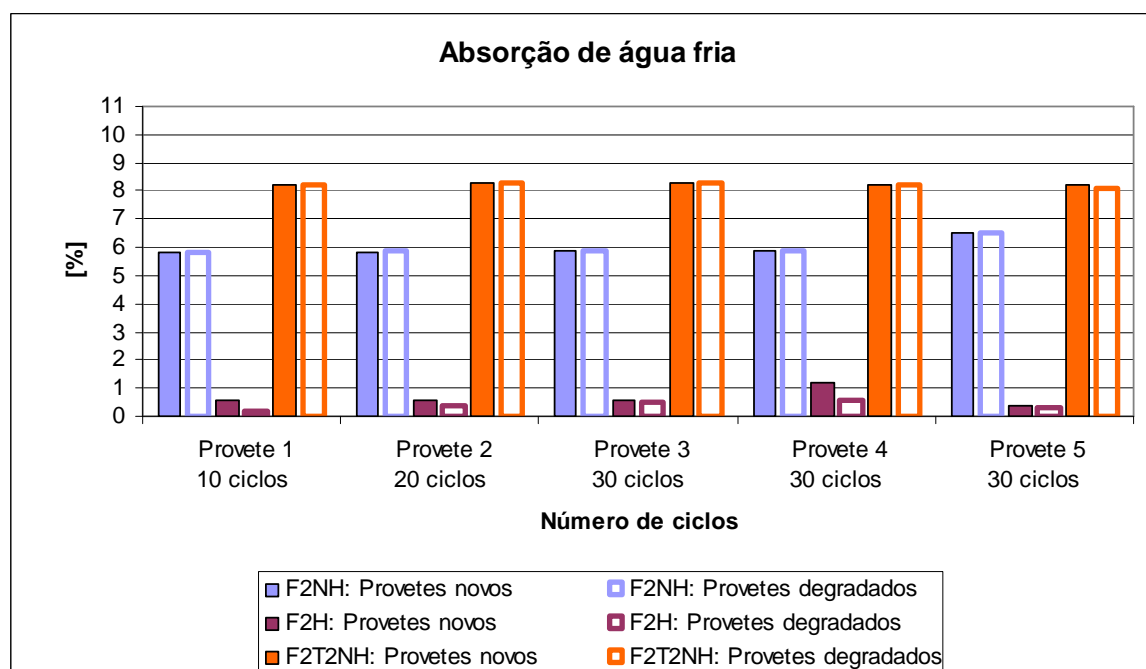


Figura 171 - Absorção de água fria dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento

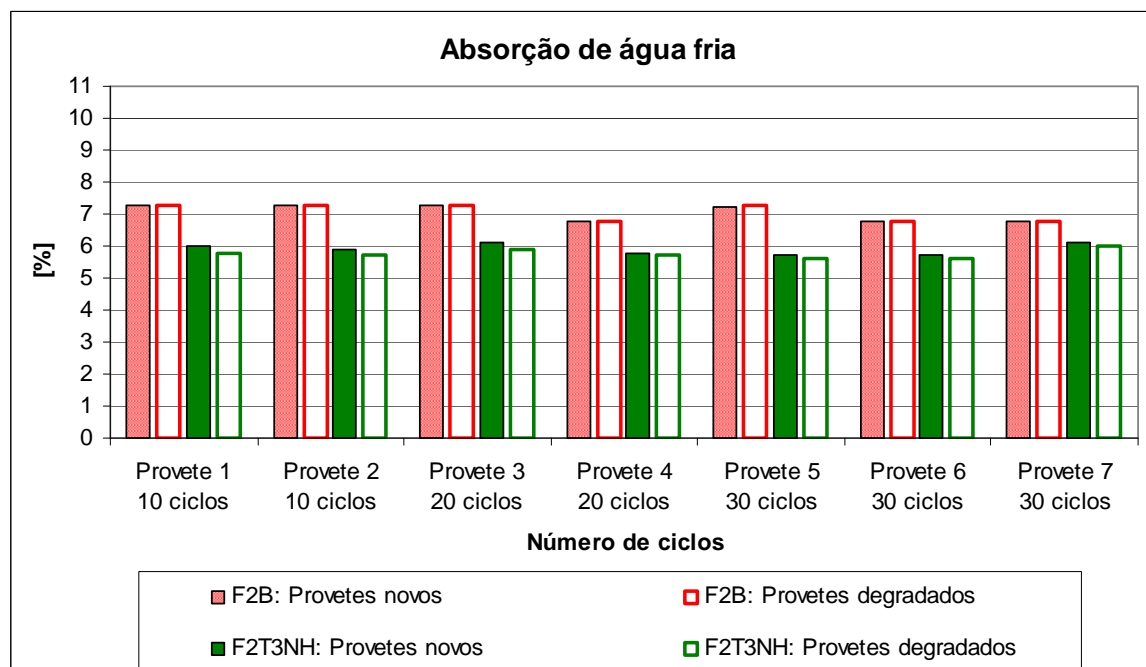


Figura 172 - Absorção de água fria dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2 antes e após envelhecimento

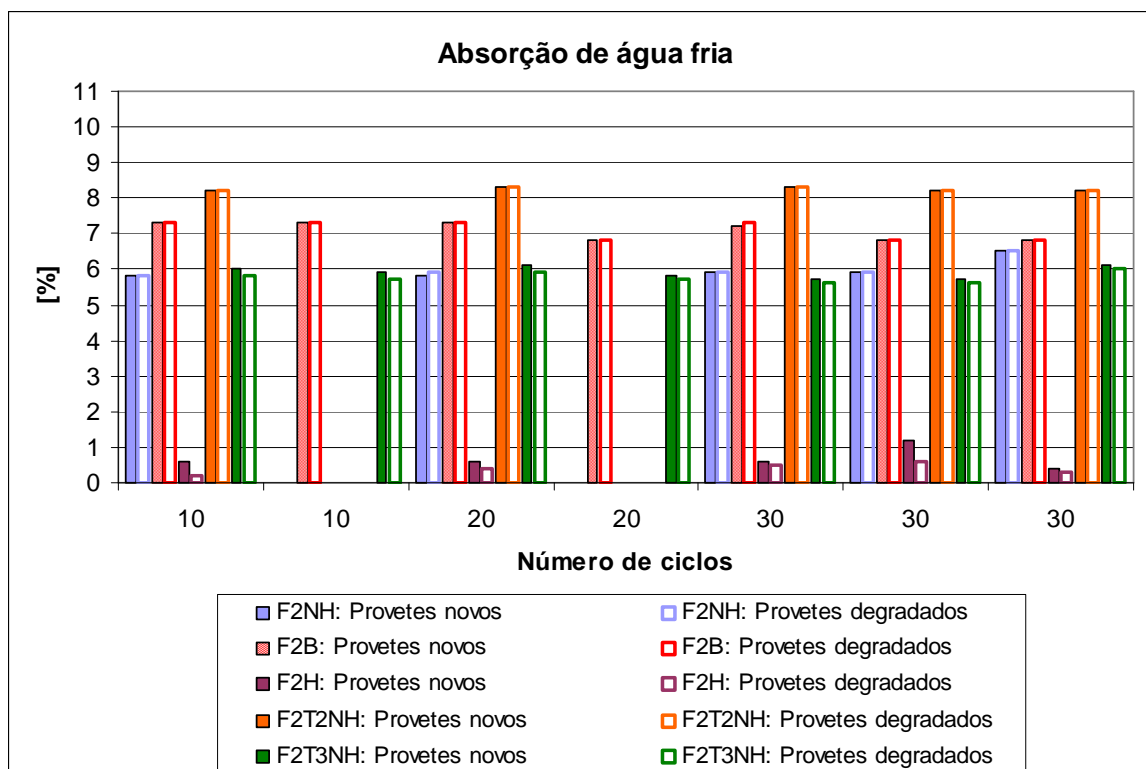


Figura 173 - Absorção de água fria dos provetes do fabricante 2 antes e após envelhecimento (gráfico global)

Os valores da absorção de água dos provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H), antes e após os ciclos de nevoeiro salino/secagem, são muito pequenos, da ordem de 1 % ou menos. Portanto o hidrofugante manteve a sua eficácia durante os ciclos do ensaio de envelhecimento acelerado.

Os diferentes valores da absorção de água dos provetes F2 H novos e a diminuição desses valores nos provetes após ensaio acelerado podem decorrer do método de ensaio não ser adequado para produtos com este nível de absorção.

Tal como nos provetes não hidrofugados do fabricante 1, também nos provetes não hidrofugados do fabricante 2 o nível de degradação atingido ao fim de 30 ciclos, mesmo que detectável visualmente, ainda não é suficiente para ser quantificável através de alterações do valor da absorção de água.

5.6.4 Absorção de água sob vácuo, massas volúmicas e porosidade aberta

Após dessalinização e secagem os provetes degradados foram sujeitos ao ensaio de absorção de água sob vácuo realizado com base na NP EN 1936:2001 [62]. Foram ensaiados os provetes não hidrofugados dos dois fabricantes, para comparação com os resultados obtidos nos provetes novos retirados da mesma telha dos degradados. Também foram ensaiados os provetes hidrofugados do fabricante 2, para avaliar o comportamento dos provetes hidrofugados a este tipo de ensaio de absorção de água, sob vácuo.

Neste ensaio é determinado o aumento de massa dos provetes após 72 horas (24 horas em depressão ao ar + 24 horas em depressão imersos em água + 24 horas imersos em água à pressão atmosférica). Por fim os provetes são pesados dentro de água para obter a massa aparente dos provetes saturados (m_h), retirados da água e limpos com um pano húmido e de novo pesados, agora ao ar, para obter a massa dos provetes saturados (m_s). Com estes valores e a massa seca dos provetes (m_d) calculam-se diversas características com as fórmulas seguintes.

Absorção de água por imersão em água sob vácuo:

$$W_s = (m_s - m_d) \times 100 / m_d \quad [\%]$$

Massa volúmica aparente:

$$\rho_b = m_d \times \rho_{rh} / (m_s - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

Porosidade aberta:

$$p_o = 100 \times (m_s - m_d) / (m_s - m_h) \quad [\%]$$

Massa volúmica real da matéria impermeável:

$$\rho_{imp} = m_d \times \rho_{rh} / (m_d - m_h) \quad [\text{kg/m}^3]$$

No Quadro 84 e no Quadro 85 são apresentadas a massa volúmica real da matéria impermeável, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em água sob vácuo dos provetes não hidrofugados do fabricante 1, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino.

Quadro 84 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F1 NH

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F1 NH 6 D	2690	2070	23,2	11,2
0	F1 NH 14 D		2060	23,3	11,3
0	F1 NH 5 D		2070	23,1	11,1
	F1 NH 9 D		2080	22,9	11,0
	F1 NH 10 D		2050	23,9	11,6
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 NH D	2690	2070	23,3	11,2
Média de 5 provetes	F1 NH D	2690	2070	23,3	11,2
Provetes degradados					
10	F1 NH 6 C	2680	2070	22,8	11,0
20	F1 NH 14 C		2070	22,9	11,1
30	F1 NH 5 C		2070	22,8	11,0
	F1 NH 9 C		2080	22,6	10,9
	F1 NH 10 C		2040	23,7	11,6
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 NH C	2680	2060	23,0	11,2
Média de 5 provetes	F1 NH C	2680	2070	23,0	11,1

Quadro 85 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F1 B

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F1 B 9 D	2680	2010	24,8	12,3
0	F1 B 13 D		2030	24,1	11,8
0	F1 B 6 D		2050	23,6	11,5
	F1 B 7 D F1 B 17 D		2030 2040	24,5 23,8	12,1 11,7
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F1 B D	2680	2040	24,0	11,8
Média de 5 provetes	F1 B D	2680	2030	24,2	11,9
Provetes degradados					
10	F1 B 9 C	2670	2000	25,1	12,5
20	F1 B 13 C		2030	23,8	11,7
30	F1 B 6 C		2030	24,0	11,8
	F1 B 7 C F1 B 17 C		2010 2030	24,7 24,1	12,2 11,9
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 B C	2670	2020	24,3	12,0
Média de 5 provetes	F1 B C	2670	2020	24,3	12,0

Na Figura 174 são apresentados graficamente os mesmos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente dos provetes não hidrofugados do fabricante 1, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino.

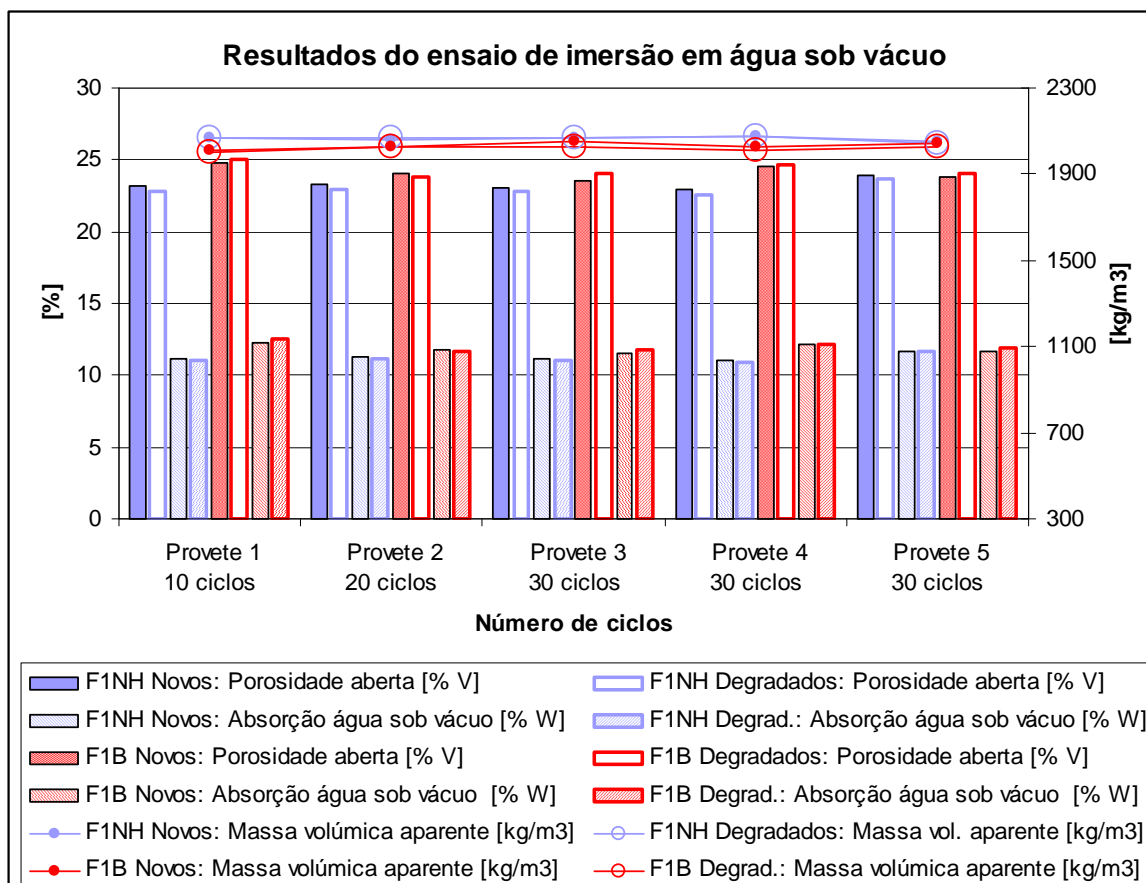


Figura 174 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes do fabricante 1

No Quadro 86 e no Quadro 87 são apresentadas a massa volúmica real da matéria impermeável, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em água sob vácuo dos provetes não hidrofugados F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino. Foram ensaiados 5 provetes de cada um destes tipos de telhas do fabricante 2.

Quadro 86 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F2 NH 8 B	2700	2210	18,2	8,2
0	F2 NH 9 B	2700	2210	18,2	8,2
0	F2 NH 4 B	2700	2210	18,1	8,2
	F2 NH 5 B	2700	2210	18,3	8,3
	F2 NH 11 B	2710	2190	19,2	8,8
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 NH B	2700	2200	18,5	8,4
Média de 5 provetes	F2 NH B	2700	2210	18,4	8,3
Provetes degradados					
10	F2 NH 8 C	2700	2200	18,2	8,3
20	F2 NH 9 C		2210	18,2	8,2
30	F2 NH 4 C		2210	18,2	8,2
	F2 NH 5 C		2200	18,3	8,3
	F2 NH 11 C		2180	19,1	8,8
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 NH C	2700	2200	18,5	8,4
Média de 5 provetes	F2 NH C	2700	2200	18,4	8,4

Quadro 87 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 T2 NH

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F2 T2 NH 5 B	2720	2140	21,4	10,0
0	F2 T2 NH 3 B		2140	21,5	10,1
0	F2 T2 NH 6 B		2140	21,5	10,0
	F2 T2 NH 10 B		2140	21,4	10,0
	F2 T2 NH 11 B		2140	21,4	10,0
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 T2 NH B	2720	2140	21,4	10,0
Média de 5 provetes	F2 T2 NH B	2720	2140	21,4	10,0
Provetes degradados					
10	F2 T2 NH 5 C	2710	2130	21,3	10,0
20	F2 T2 NH 3 C		2130	21,4	10,1
30	F2 T2 NH 6 C		2130	21,3	10,0
	F2 T2 NH 10 C		2130	21,3	10,0
	F2 T2 NH 11 C		2130	21,3	10,0
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T2 NH C	2710	2130	21,3	10,0
Média de 5 provetes	F2 T2 NH C	2710	2130	21,3	10,0

Na Figura 175 são apresentados graficamente os mesmos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente dos provetes não hidrofugados F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino. Foram ensaiados 5 provetes de cada um destes tipos de telhas do fabricante 2.

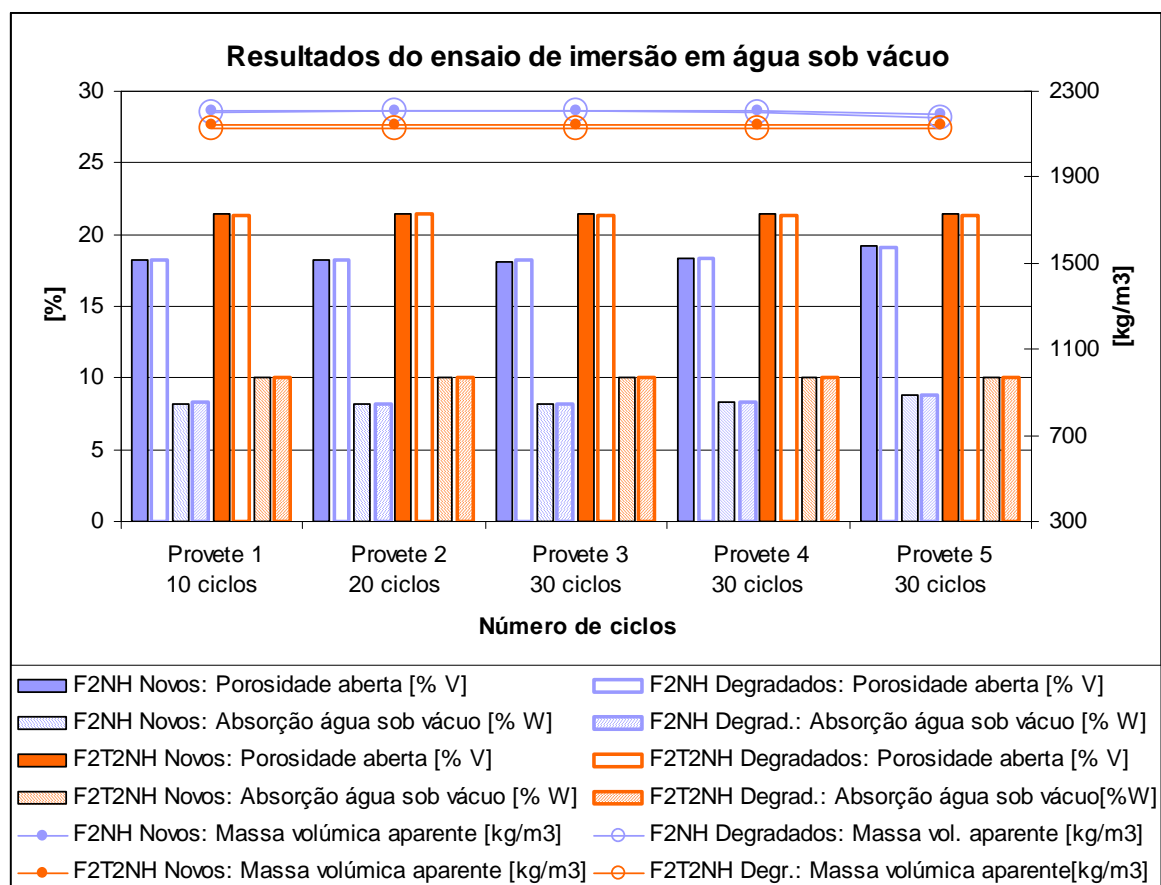


Figura 175 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 NH e F2 T2 NH do fabricante 2

No Quadro 88 e no Quadro 89 são apresentadas a massa volúmica real da matéria impermeável, a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e a absorção de água por imersão em água sob vácuo dos provetes não hidrofugados F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino. Foram ensaiados 7 provetes de cada um destes tipos de telhas do fabricante 2.

Quadro 88 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F2 B 7 B	2650	2070	22,1	10,7
	F2 B 8 B		2070	22,1	10,7
0	F2 B 6 B		2070	22,1	10,7
	F2 B 9 B		2080	21,4	10,3
0	F2 B 5 B		2060	22,2	10,7
	F2 B 10 B		2080	21,5	10,3
	F2 B 11 B		2080	21,4	10,3
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 B B	2650	2070	21,7	10,4
Média de 7 provetes	F2 B B	2650	2070	21,8	10,5
Provetes degradados					
10	F2 B 7 C	2640	2060	22,1	10,7
	F2 B 8 C		2060	22,0	10,7
20	F2 B 6 C		2060	22,1	10,8
	F2 B 9 C		2070	21,5	10,4
30	F2 B 5 C		2060	22,1	10,7
	F2 B 10 C		2070	21,5	10,4
	F2 B 11 C		2070	21,4	10,4
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 B C	2640	2070	21,7	10,5
Média de 7 provetes	F2 B C	2640	2060	21,8	10,6

Quadro 89 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 T3 NH

Nº de ciclos	Provetes	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
Provetes novos					
0	F2 T3 NH 8 B	2700	2210	18,1	8,2
	F2 T3 NH 10 B	---	---	---	---
0	F2 T3 NH 11 B	---	---	---	---
	F2 T3 NH 12 B	2700	2220	17,9	8,1
0	F2 T3 NH 3 B	2700	2220	17,7	8,0
	F2 T3 NH 4 B	2700	2220	17,6	7,9
	F2 T3 NH 6 B	2700	2210	18,3	8,3
Média de 3 provetes a submeter a 30 ciclos	F2 T3 NH B	2700	2220	17,9	8,1
Média de 5 provetes	F2 T3 NH B	2700	2220	17,9	8,1
Provetes degradados					
10	F2 T3 NH 8 C	2690	2210	17,9	8,1
	F2 T3 NH 10 C	2690	2210	17,9	8,1
20	F2 T3 NH 11 C	2690	2200	18,1	8,2
	F2 T3 NH 12 C	2690	2210	17,8	8,1
30	F2 T3 NH 3 C	2690	2210	17,6	7,9
	F2 T3 NH 4 C	2680	2210	17,5	7,9
	F2 T3 NH 6 C	2690	2200	18,2	8,3
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T3 NH C	2690	2210	17,8	8,0
Média de 7 provetes	F2 T3 NH C	2690	2210	17,9	8,1

Na Figura 176 são apresentados graficamente os mesmos valores da porosidade aberta, da absorção de água por imersão em água sob vácuo e da massa volúmica aparente dos provetes não hidrofugados F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino. Foram ensaiados 7 provetes de cada um destes tipos de telhas do fabricante 2.

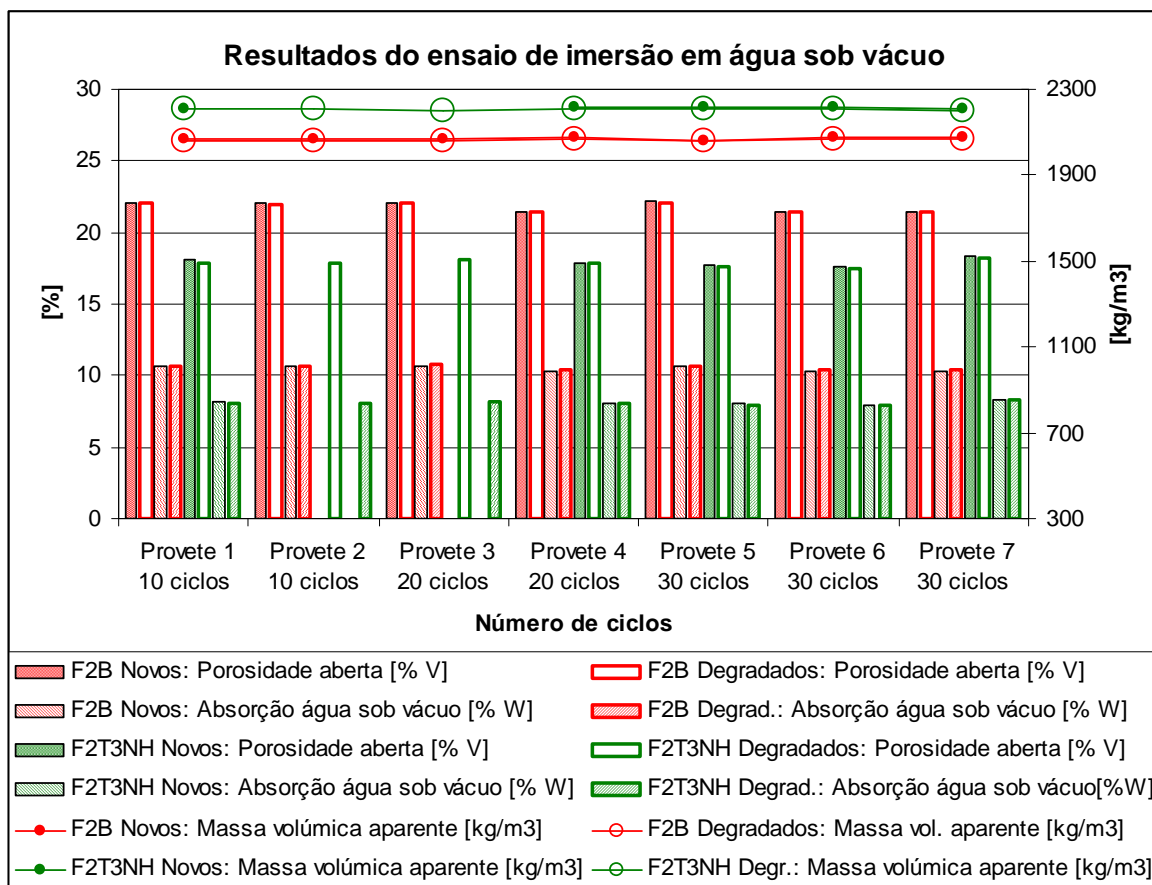


Figura 176 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

Os resultados obtidos mostram que ou não existiu variação destas características hídricas entre os provetes novos e os degradados, ou nos casos em que houve alteração, a variação foi muito pequena.

Portanto as variações destas características hídricas não quantificam a degradação observada nos provetes ao fim de 30 ciclos de nevoeiro salino/secagem, mesmo nos casos em que a alteração é detectável visualmente.

Após o ensaio de envelhecimento acelerado os provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H) foram sujeitos ao ensaio de imersão em água sob vácuo, cujos resultados são apresentados no Quadro 90.

Quadro 90 - Resultados do ensaio de imersão em água sob vácuo dos provetes F2 H

Nº de ciclos	Provetes degradados	Massa volúmica real ρ_{imp} [kg/m ³]	Massa volúmica aparente ρ_b [kg/m ³]	Porosidade aberta p_o [% V]	Absorção de água sob vácuo W_s [% W]
10	F2 H 7 C	2680	2200	17,9	8,1
20	F2 H 5 C	2690	2200	18,0	8,2
30	F2 H 3 C	2680	2190	18,0	8,2
	F2 H 6 C	2690	2190	18,6	8,5
	F2 H 8 C	2680	2220	16,9	7,6
Média de 3 provetes	F2 H C	2680	2200	17,8	8,1
Média de 5 provetes	F2 H C	2680	2200	17,9	8,1

As características hídricas dos provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H), obtidas no ensaio de imersão em água sob vácuo, são idênticas às mesmas características dos provetes F2 NH (vd. Quadro 86).

As telhas F2 H são telhas F2 NH que no fim da linha de fabrico são imersas no produto hidrofugante. Como se observa no Quadro 91, a absorção de água à pressão atmosférica dos provetes não hidrofugados é de cerca de 6 % e a dos provetes hidrofugados é inferior a 1 %. A absorção de água sob vácuo é de cerca de 8 % nos dois tipos de provetes.

Quadro 91 - Comparação das absorções de água de provetes F2 NH e F2 H

Nº de ciclos	Provetes degradados	Abs. de água por imersão W_u [%]	Abs. de água sob vácuo W_s [%]	Provetes degradados	Abs. de água por imersão W_u [%]	Abs. de água sob vácuo W_s [%]
10	F2 NH 8 C	5,8	8,3	F2 H 7 C	0,2	8,1
20	F2 NH 9 C	5,9	8,2	F2 H 5 C	0,4	8,2
30	F2 NH 4 C	5,9	8,2	F2 H 3 C	0,5	8,2
	F2 NH 5 C	5,9	8,3	F2 H 6 C	0,6	8,5
	F2 NH 11 C	6,5	8,8	F2 H 8 C	0,3	7,6
Média de 3	F2 NH C	6,1	8,4	F2 H C	0,5	8,1
Média de 5	F2 NH C	6,0	8,4	F2 H C	0,4	8,1

Isto quer dizer que o produto hidrofugante impede a entrada de água à pressão atmosférica, mas não consegue impedir a impregnação dos poros quando os provetes são imersos em água sob vácuo.

Este comportamento pode ser explicado por o produto hidrofugante aderir à superfície dos poros hidrofugados e não os preencher totalmente. Assim impede a entrada de água por capilaridade mas já não consegue impedir o preenchimento dos poros pela água quando esta é impelida a preencher os espaços deixados vazios pela extracção do ar provocada pela depressão imposta ao recipiente onde decorre o ensaio. Vencida a camada superficial hidrofugada é possível o acesso da água ao interior não hidrofugado dos provetes e a sua impregnação, obtendo-se assim uma absorção de água idêntica à dos provetes não hidrofugados.

Depois do ensaio de imersão em água sob vácuo, os provetes hidrofugados (F2 H) foram de novo submetidos ao ensaio de imersão em água fria à pressão atmosférica. As absorções de água obtidas (Quadro 92) são inferiores às dos provetes não hidrofugados, no entanto superiores aos valores obtidos antes do ensaio sob vácuo. O ensaio de imersão em água sob vácuo afectou parcialmente a eficácia do produto hidrofugante.

Quadro 92 - Absorções de água por imersão e sob vácuo dos provetes F2 H

Nº de ciclos	Provetes degradados	Abs. de água por imersão W_u [%]	Abs. de água sob vácuo W_s [%]	Abs. de água por imersão após ensaio sob vácuo W_u [%]
10	F2 H 7 C	0,2	8,1	1,1
20	F2 H 5 C	0,4	8,2	1,0
30	F2 H 3 C	0,5	8,2	1,6
	F2 H 6 C	0,6	8,5	3,0
	F2 H 8 C	0,3	7,6	0,4
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 H C	0,5	8,1	1,7
Média de 5 provetes	F2 H C	0,4	8,1	1,4

5.6.5 Coeficiente de saturação

O coeficiente de saturação dos provetes degradados foi calculado a partir da absorção de água por imersão em água fria (W_u) e da absorção de água sob vácuo (W_s) usando a fórmula:

$$S = 100 \times W_u / W_s \quad [\%]$$

No Quadro 93 e na Figura 177 são apresentados os coeficientes de saturação de provetes novos e de provetes degradados de telhas não hidrofugadas do fabricante 1.

Quadro 93 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 1

Nº de ciclos	Provetes novos	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]	Nº de ciclos	Provetes degradados	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
F1 NH					
0	F1 NH 6 C-D	83	10	F1 NH 6 C	84
0	F1 NH 14 C-D	83	20	F1 NH 14 C	84
0	F1 NH 5 C-D	83	30	F1 NH 5 C	84
	F1 NH 9 C-D	84		F1 NH 9 C	83
	F1 NH 10 C-D	87		F1 NH 10 C	86
Média de 3 prov.	F1 NH C-D	85		F1 NH C	84
Média de 5 prov.	F1 NH C-D	84		F1 NH C	84
F1 B					
0	F1 B 9 C-D	80	10	F1 B 9 C	78
0	F1 B 13 C-D	76	20	F1 B 13 C	77
0	F1 B 6 C-D	79	30	F1 B 6 C	77
	F1 B 7 C-D	79		F1 B 7 C	79
	F1 B 17 C-D	79		F1 B 17 C	76
Média de 3	F1 B C-D	79		F1 B C	77
Média de 5	F1 B C-D	79		F1 B C	77

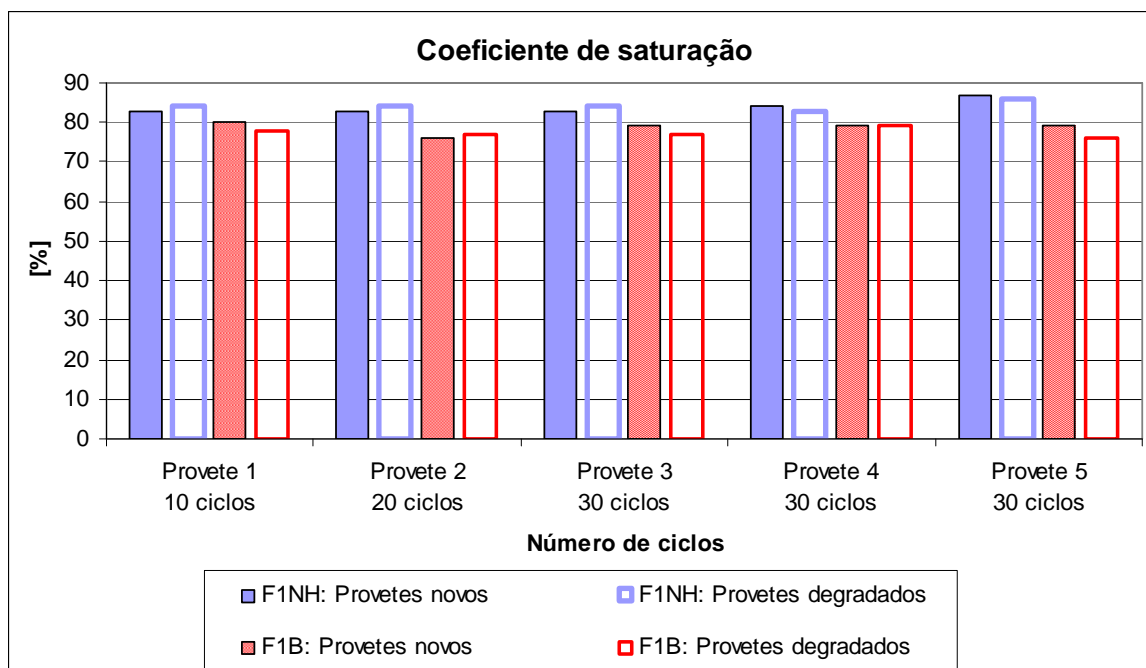


Figura 177 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 1

No Quadro 94 e no Quadro 95 são apresentados os coeficientes de saturação de provetes novos e de provetes degradados de telhas não hidrofugadas do fabricante 2.

Quadro 94 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 NH do fabricante 2

Nº de ciclos	Provetes novos	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]	Nº de ciclos	Provetes degradados	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
F2 NH					
0	F2 NH 8 C-B	71	10	F2 NH 8 C	70
0	F2 NH 9 C-B	71	20	F2 NH 9 C	72
0	F2 NH 4 C-B	72	30	F2 NH 4 C	72
	F2 NH 5 C-B	71		F2 NH 5 C	71
	F2 NH 11 C-B	74		F2 NH 11 C	74
Média de 3 prov.	F2 NH C-B	72		F2 NH C	72
Média de 5 prov.	F2 NH C-B	72		F2 NH C	72

Quadro 95 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 B, F2 T2 NH e F2 T3 NH

Nº de ciclos	Provetes novos	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]	Nº de ciclos	Provetes degradados	Coeficiente de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
F2 B					
0	F2 B 7 C-B F2 B 8 C-B	68 68	10	F2 B 7 C F2 B 8 C	68 68
0	F2 B 6 C-B F2 B 9 C-B	68 66	20	F2 B 6 C F2 B 9 C	68 65
0	F2 B 5 C-B F2 B 10 C-B F2 B 11 C-B	67 66 66	30	F2 B 5 C F2 B 10 C F2 B 11 C	68 65 65
Média de 3 prov.	F2 B C-B	66		F2 B C	66
Média de 7 prov.	F2 B C-B	67		F2 B C	67
F2 T2 NH					
0	F2 T2 NH 5 C-B	82	10	F2 T2 NH 5 C	82
0	F2 T2 NH 3 C-B	82	20	F2 T2 NH 3 C	82
0	F2 T2 NH 6 C-B F2 T2 NH 10C-B F2 T2 NH 11C-B	83 82 82	30	F2 T2 NH 6 C F2 T2 NH 10 C F2 T2 NH 11 C	83 82 81
Média de 3 prov.	F2 T2 NH C-B	82		F2 T2 NH C	82
Média de 5 prov.	F2 T2 NH C-B	82		F2 T2 NH C	82
F2 T3 NH					
0	F2 T3 NH 8 C-B F2 T3 NH 10C-B	73 ---	10	F2 T3 NH 8 C F2 T3 NH 10 C	72 70
0	F2 T3 NH 11C-B F2 T3 NH 12C-B	---	20	F2 T3 NH 11 C F2 T3 NH 12 C	72 70
0	F2 T3 NH 3 C-B F2 T3 NH 4 C-B F2 T3 NH 6 C-B	71 72 73	30	F2 T3 NH 3 C F2 T3 NH 4 C F2 T3 NH 6 C	71 71 72
Média de 3 prov.	F2 T3 NH C-B	72	Média de 3	F2 T3 NH C	71
Média de 5 prov.	F2 T3 NH C-B	72	Média de 7	F2 T3 NH C	71

No Quadro 96 são apresentados os valores das absorções de água e do coeficiente de saturação dos provetes hidrofugados do fabricante 2 (F2 H), depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado na câmara de nevoeiro salino.

Quadro 96 - Coeficiente de saturação dos provetes F2 H do fabricante 2

Nº de ciclos	Provetes degradados	Abs. de água por imersão W_u [%]	Absorção de água sob vácuo W_s [%]	Coef. de saturação $100 \times W_u / W_s$ [%]
10	F2 H 7 C	0,2	8,1	2,5
20	F2 H 5 C	0,4	8,2	4,9
30	F2 H 3 C	0,5	8,2	6,1
	F2 H 6 C	0,6	8,5	7,1
	F2 H 8 C	0,3	7,6	3,9
Média de 3 prov.	F2 H C	0,5	8,1	5,7
Média de 5 prov.	F2 H C	0,4	8,1	4,9

O valor reduzido do coeficiente de saturação dos provetes hidrofugados deve-se à absorção de água por imersão ter valores tão pequenos, inferiores a 1 %, e a absorção de água sob vácuo ter valores idênticos aos dos provetes não hidrofugados.

Na Figura 178 são apresentados graficamente os valores do coeficiente de saturação dos provetes F2 NH e F2 T2 NH, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado, e os valores do coeficiente de saturação dos provetes F2 H, depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado. Foram ensaiados cinco provetes de cada um destes tipos de telhas do fabricante 2.

Na Figura 179 são apresentados graficamente os valores do coeficiente de saturação dos provetes F2 B e F2 T3 NH, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado. Foram ensaiados sete provetes de cada um destes tipos de telhas.

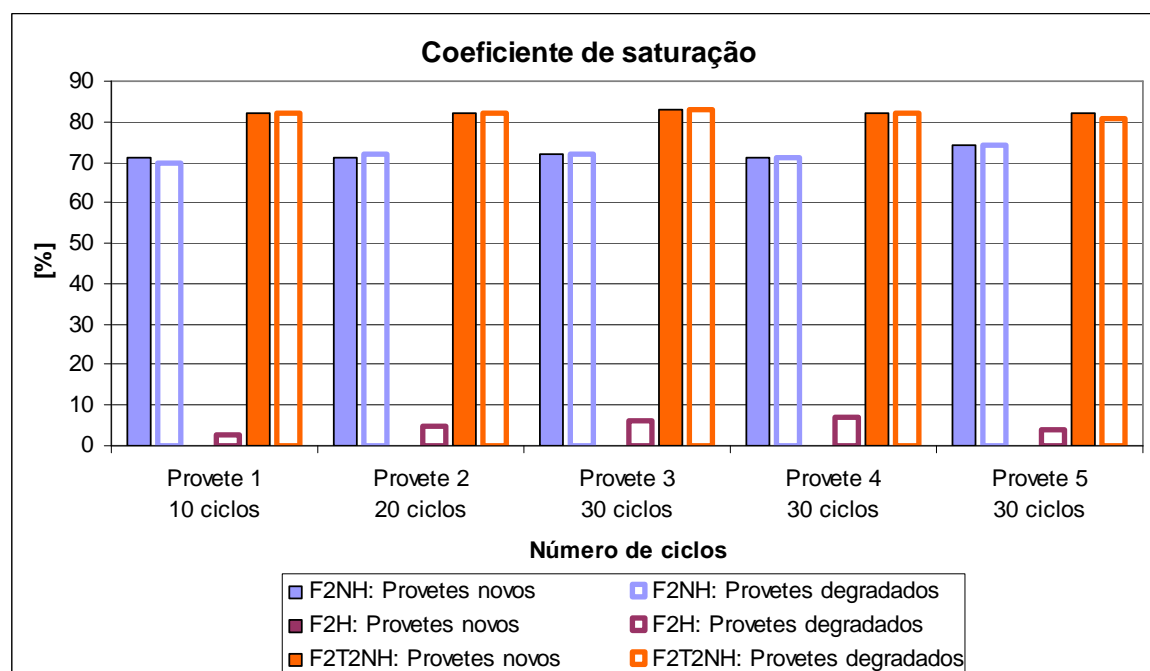


Figura 178 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 NH, F2 H e F2 T2 NH

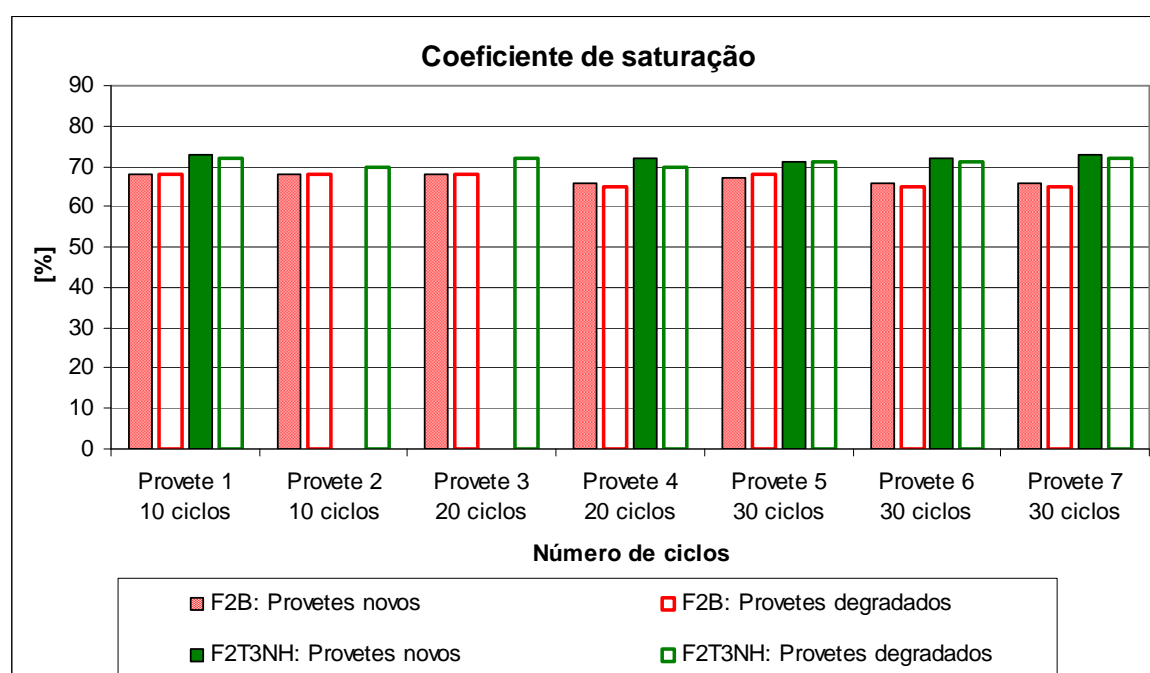


Figura 179 - Coeficientes de saturação dos provetes F2 B e F2 T3 NH do fabricante 2

A Figura 180 apresenta o gráfico global do coeficiente de saturação de todos os provetes dos cinco tipos de telhas do fabricante 2, antes e depois de sujeitos ao envelhecimento acelerado.

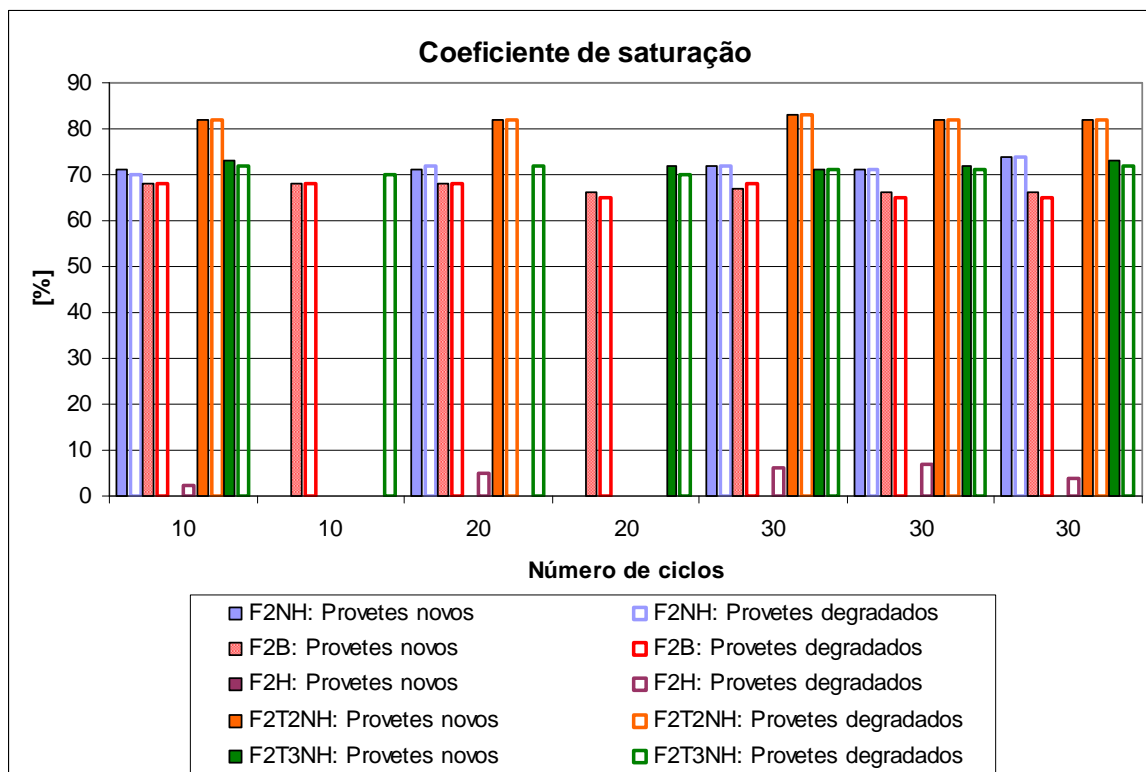


Figura 180 - Coeficientes de saturação dos provetes do fabricante 2 (gráfico global)

Os resultados obtidos mostram que ou não existiu variação do coeficiente de saturação entre os provetes novos e os degradados, ou nos casos em que houve alteração, a variação foi muito pequena.

5.6.6 Absorção de água por contacto superficial de esponja

Após dessalinização e secagem a 60 °C até massa constante alguns dos provetes degradados foram sujeitos ao ensaio de absorção de água por contacto superficial de esponja.

Foram determinadas as massas de água absorvidas pelos provetes após 30 segundos, 60 segundos, 120 segundos e 180 segundos de contacto entre a esponja e o provete. Com estes valores traçaram-se os gráficos da absorção de água em função da raiz quadrada do tempo de contacto e foram obtidas por regressão linear as rectas que melhor se aproximam desses pontos. A partir das rectas foi calculada a massa de água absorvida (g) ao fim de 2 minutos de contacto.

No Quadro 97 e na Figura 181 são apresentados os resultados dos ensaios realizados sobre provetes do fabricante 1, novos e após ensaio acelerado de nevoeiro salino/secagem.

No Quadro 98 e na Figura 182 são apresentados os resultados dos ensaios realizados sobre provetes do fabricante 2, novos e após ensaio acelerado de nevoeiro salino/secagem.

Os resultados mostram que as absorções de água dos provetes novos e dos provetes sujeitos ao ensaio acelerado são quase iguais, aumentando muito pouco nuns casos e diminuindo muito pouco noutros.

Quadro 97 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes degradados e novos do fabricante 1

Nº de ciclos	Provetes degradados	Água absorvida após contacto da esponja durante:				Água absorvida após 2 minutos (cálculo)	
		30 seg.	60 seg.	120 seg.	180 seg.	Provetes degradados	Provetes novos
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
10	F1 NH 6 C	0,50	0,73	1,05	1,30	1,05	1,07
20	F1 NH 14 C	0,50	0,73	1,08	1,35	1,08	1,12
30	F1 NH 5 C	0,51	0,82	1,12	1,41	1,14	1,11
	F1 NH 9 C	0,48	0,72	1,04	1,30	1,04	1,06
	F1 NH 10 C	0,55	0,81	1,14	1,41	1,15	1,20
Média de 3 prov.	F1 NH C					1,11	1,12
Média de 5 prov.	F1 NH C					1,09	1,11
10	F1 B 9 C	0,43	0,62	0,81	0,97	0,81	0,84
20	F1 B 13 C	0,30	0,44	0,62	0,73	0,60	0,66
30	F1 B 6 C	0,38	0,51	0,71	0,85	0,71	0,70
	F1 B 7 C	0,40	0,54	0,75	0,89	0,74	0,74
	F1 B 17 C	0,38	0,53	0,69	0,83	0,70	0,71
Média de 3 prov.	F1 B C					0,72	0,72
Média de 5 prov.	F1 B C					0,71	0,73
10	F1 H 6 C	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07
30	F1 H 7 C	–	–	–	–	–	0,07
	F1 H 8 C	–	–	–	–	–	0,07
Média de 2 prov.	F1 H C					–	0,07
Média de 3 prov.	F1 H C					–	0,07

Quadro 98 - Absorção de água por contacto superficial de esponja de provetes degradados e novos do fabricante 2

Nº de ciclos	Provetes degradados	Água absorvida após contacto da esponja durante:				Água absorvida após 2 minutos (cálculo)	
		30 seg.	60 seg.	120 seg.	180 seg.	Provetes degradados	Provetes novos
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
10	F2 NH 8 C	0,18	0,25	0,35	0,43	0,35	0,33
20	F2 NH 9 C	–	–	–	–	–	0,36
30	F2 NH 4 C F2 NH 5 C F2 NH 11 C	–	–	–	–	–	0,43 0,39 0,41
Média de 3 prov.	F2 NH C					–	0,41
Média de 5 prov.	F2 NH C					–	0,38
10	F2 H 7 C	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,05
20	F2 H 5 C	–	–	–	–	–	0,05
30	F2 H 3 C F2 H 6 C F2 H 8 C	–	–	–	–	–	0,05 0,06 0,05
Média de 3 prov.	F2 H C					–	0,05
Média de 5 prov.	F2 H C					–	0,05
10	F2 T2 NH 5 C	0,25	0,41	0,57	0,70	0,57	0,53
20	F2 T2 NH 3 C	0,23	0,34	0,49	0,61	0,49	0,53
30	F2 T2 NH 6 C F2 T2 NH 10 C F2 T2 NH 11 C	0,26 0,30 0,26	0,37 0,41 0,36	0,55 0,57 0,52	0,67 0,72 0,63	0,55 0,58 0,52	0,52 0,53 0,52
Média de 3 prov.	F2 T2 NH C					0,55	0,52
Média de 5 prov.	F2 T2 NH C					0,54	0,53

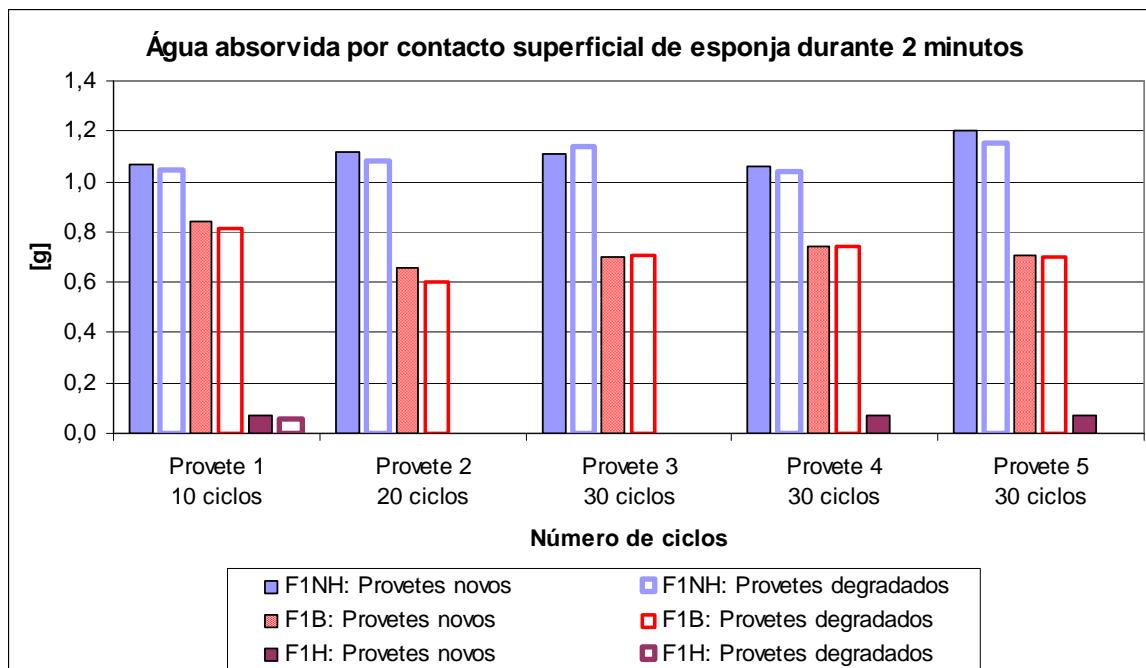


Figura 181 - Água absorvida por contacto superficial de esponja por provetes do fabricante 1 antes e após envelhecimento

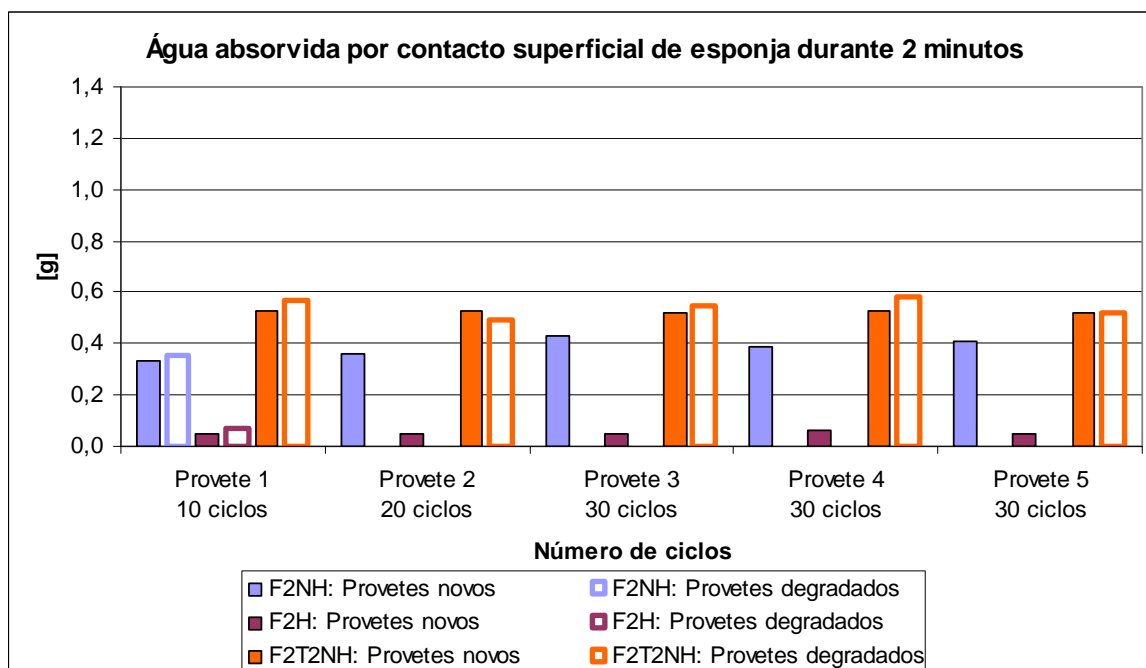


Figura 182 - Água absorvida por contacto superficial de esponja por provetes do fabricante 2 antes e após envelhecimento

5.6.7 Velocidade de propagação de ultra-sons - método indirecto

Os provetes submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado de nevoeiro salino/secagem foram sujeitos ao ensaio de propagação de ultra-sons utilizando o equipamento modelo BP7 da STENKAMP (Figura 56) e os mesmos transdutores exponenciais utilizados no ensaio dos provetes antes do envelhecimento.

Os provetes foram ensaiados antes e após dessalinização, tendo sido em ambos os casos previamente secos em estufa a 60 °C até atingirem massa constante.

No Quadro 99 e no gráfico da Figura 183 são apresentados os valores da velocidade de propagação de ultra-sons em provetes novos e em provetes degradados do fabricante 1. Para os provetes degradados são apresentadas as velocidades de transmissão de ultra-sons em provetes não dessalinizados e após dessalinização.

Quadro 99 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1

Número de ciclos	Provetes	Antes do ensaio de envelhecimento [m/s]	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem	
			Antes da dessalinização [m/s]	Após dessalinização [m/s]
10	F1 NH 6 B-C	2780	3065	2660
20	F1 NH 14 B-C	2600	2910	2570
30	F1 NH 5 B-C	2770	---	2650
	F1 NH 9 B-C	2700	---	2600
	F1 NH 10 B-C	2580	2740	2460
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 NH	2680	2740	2570
Média de 5 provetes	F1 NH	2690	2910	2590
10	F1 B 9 B-C	3100	3365	3160
20	F1 B 13 B-C	3330	3480	3200
30	F1 B 6 B-C	3270	---	3160
	F1 B 7 B-C	3230	3440	3190
	F1 B 17 B-C	3260	---	3180
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 B	3250	3440	3180
Média de 5 provetes	F1 B	3240	3430	3180
10	F1 H 6 B-C	2720	2770	2630
20	F1 H 3 B-C	2520	2640	2360
30	F1 H 5 B-C	2790	2750	2660
	F1 H 7 B-C	2660	2840	2400
	F1 H 8 B-C	2790	2830	2720
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F1 H	2750	2810	2590
Média de 5 provetes	F1 H	2700	2770	2550

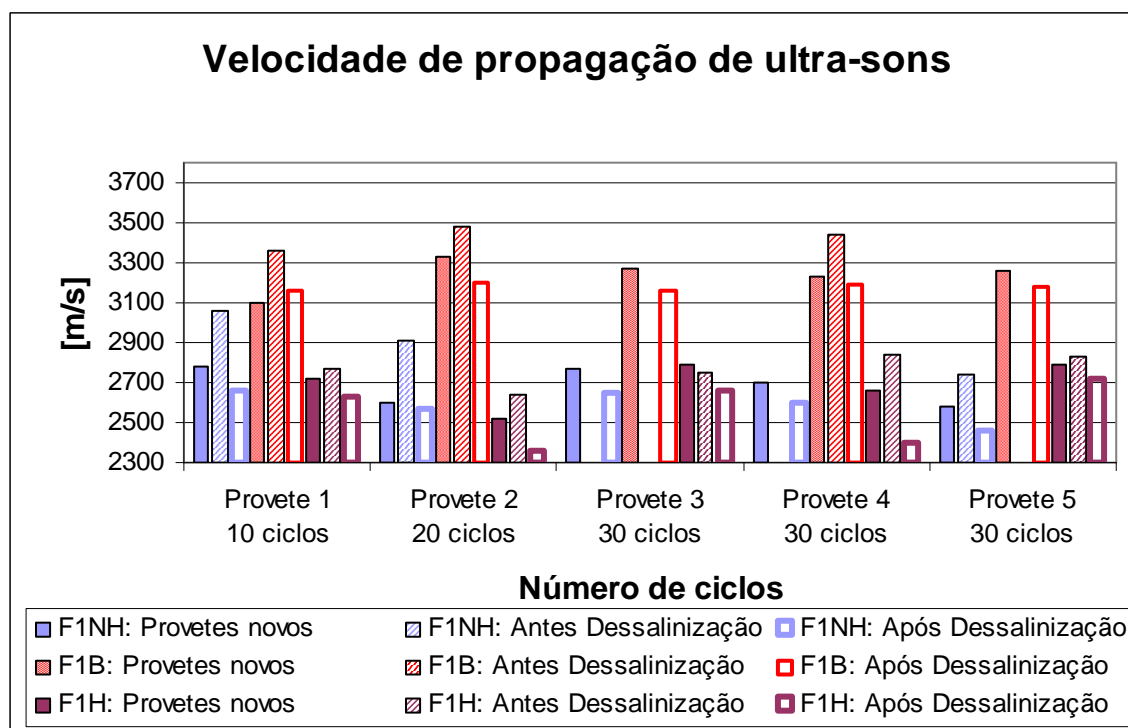


Figura 183 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 1

Verifica-se que nos provetes não hidrofugados (F1 NH e F1 B) a velocidade de propagação de ultra-sons dos provetes antes da dessalinização é superior à velocidade dos provetes novos. O mesmo se passa nos provetes hidrofugados que sofreram maior degradação visível (F1 H 3 C e F1 H 7 C).

No caso dos provetes hidrofugados que aparentemente não se degradaram, a velocidade de propagação dos ultra-sons dos provetes antes da dessalinização é apenas ligeiramente superior ou até inferior à dos provetes novos.

Após dessalinização a velocidade de propagação de ultra-sons diminui para valores inferiores à dos provetes novos, com excepção do ligeiro aumento da velocidade de propagação no provete F1 B que foi exposto a 10 ciclos.

No Quadro 100, no Quadro 101, na Figura 184 e na Figura 185 são apresentados os valores da velocidade de propagação de ultra-sons nos provetes do fabricante 2 antes e após ensaio de envelhecimento acelerado. Para os provetes degradados são apresentadas as velocidades de propagação de ultra-sons em provetes não dessalinizados e após dessalinização.

Também nos provetes não hidrofugados do fabricante 2 (F2 NH, F2 B, F2 T2 NH e F2 T3 NH) a velocidade de propagação de ultra-sons dos provetes antes da dessalinização é superior à velocidade dos provetes novos.

Nos provetes hidrofugados do fabricante 2, que aparentemente não se degradaram, a velocidade de propagação de ultra-sons mantém-se praticamente igual nos três estados dos provetes.

Após dessalinização a velocidade de propagação de ultra-sons diminui para valores inferiores à dos provetes novos, com exceção de um provete F2 T2 NH que foi exposto a 30 ciclos e cuja velocidade de propagação após dessalinização é igual à do provete novo.

Quadro 100 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 NH, F2 B e F2 H do fabricante 2

Número de ciclos	Provetes	Antes do ensaio de envelhecimento [m/s]	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem	
			Antes da dessalinização [m/s]	Após dessalinização [m/s]
10	F2 NH 8 C	3410	3680	3350
20	F2 NH 9 C	3400	3530	3300
30	F2 NH 4 C	3330	3490	3260
	F2 NH 5 C	3430	3540	3280
	F2 NH 11 C	3350	3450	3250
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 NH	3370	3490	3260
Média de 5 provetes	F2 NH	3380	3540	3290
10	F2 B 7 C	3520	3720	3400
	F2 B 8 C	3460	3660	3350
20	F2 B 6 C	3550	3730	3450
	F2 B 9 C	3540	3750	3430
30	F2 B 5 C	3560	3660	3350
	F2 B 10 C	3540	3740	3490
	F2 B 11 C	3570	3740	3510
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 B	3560	3710	3450
Média de 7 provetes	F2 B	3530	3710	3430
10	F2 H 7 C	3340	3280	3370
20	F2 H 5 C	3350	3320	3340
30	F2 H 3 C	3320	3330	3310
	F2 H 6 C	3350	3310	3370
	F2 H 8 C	3530	3460	3450
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 H	3400	3370	3380
Média de 5 provetes	F2 H	3380	3340	3370

Quadro 101 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes F2 T2 NH e F2 T3 NH

Número de ciclos	Provetes	Antes do ensaio de envelhecimento [m/s]	Após ciclos de nevoeiro salino/secagem	
			Antes da dessalinização [m/s]	Após dessalinização [m/s]
10	F2 T2 NH 5 C	3040	3230	2980
20	F2 T2 NH 3 C	3040	3170	2900
30	F2 T2 NH 6 C	3120	3210	2960
	F2 T2 NH 10 C	2990	3230	2990
	F2 T2 NH 11 C	3080	3220	3000
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T2 NH	3060	3220	2980
Média de 5 provetes	F2 T2 NH	3050	3210	2970
10	F2 T3 NH 8 C	3420	3710	3380
	F2 T3 NH 10 C	3430	3710	3380
20	F2 T3 NH 11 C	3380	3620	3330
	F2 T3 NH 12 C	3420	3610	3330
30	F2 T3 NH 3 C	3470	3760	3420
	F2 T3 NH 4 C	3410	3700	3310
	F2 T3 NH 6 C	3360	3630	3320
Média de 3 provetes sujeitos a 30 ciclos	F2 T3 NH	3410	3700	3350
Média de 7 provetes	F2 T3 NH	3410	3680	3350

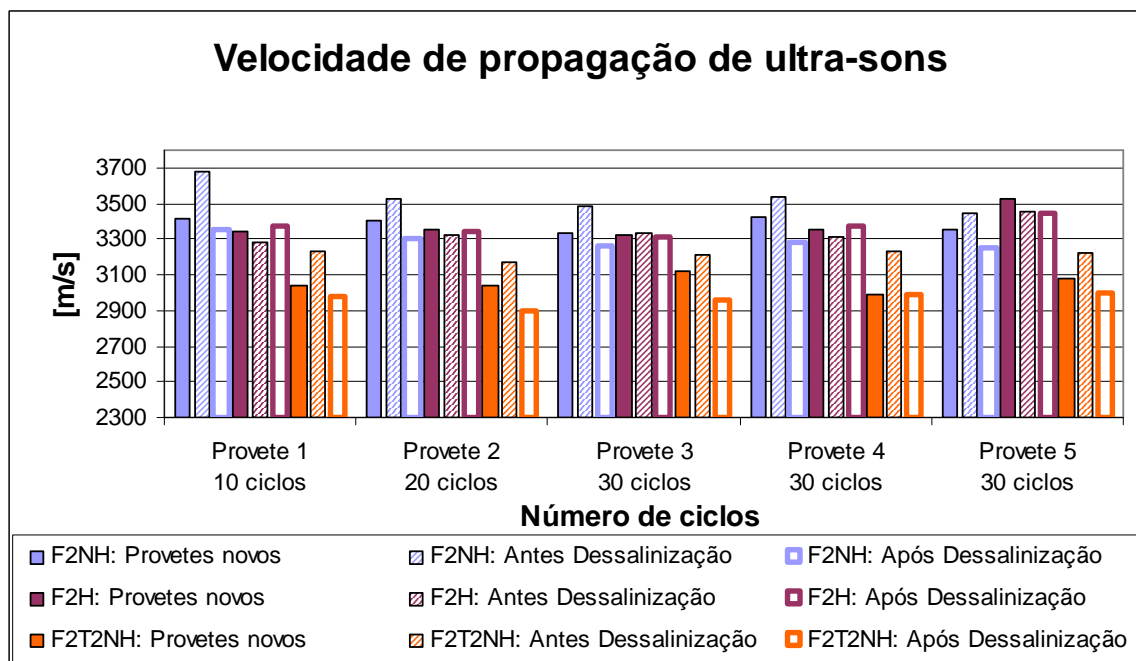


Figura 184 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 2 - grupo 1

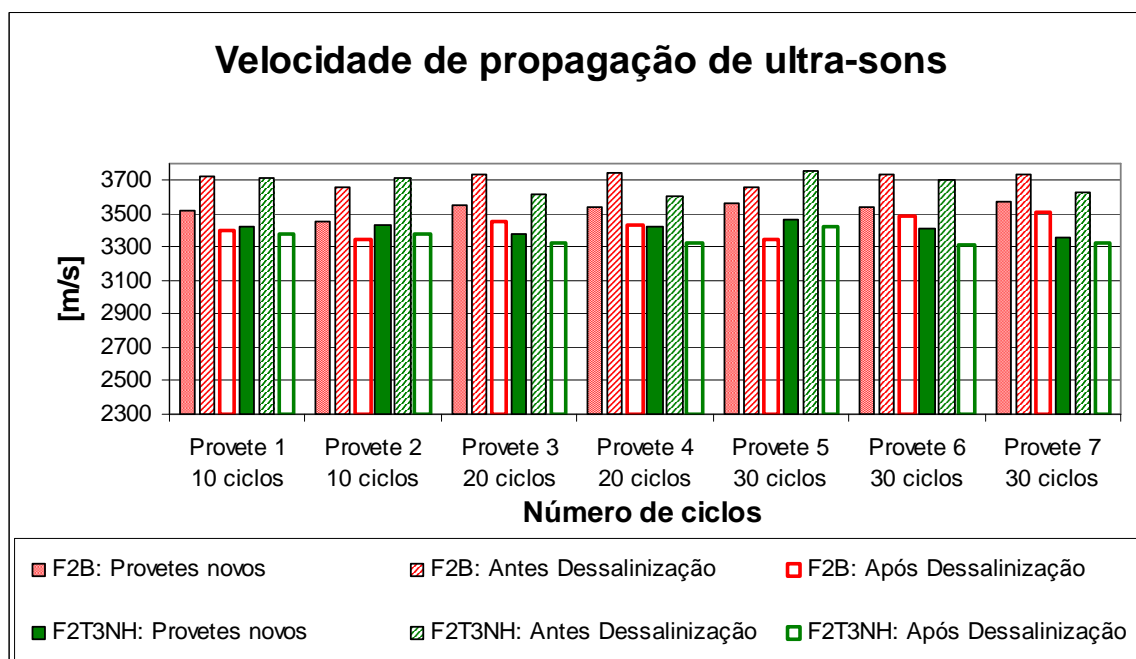


Figura 185 - Velocidade de propagação de ultra-sons em provetes do fabricante 2 - grupo 2

A velocidade de transmissão de ultra-sons antes do ensaio de envelhecimento é maior nos provetes do fabricante 2, com excepção dos do modelo T2, e menor nos provetes vermelhos hidrofugados e não hidrofugados do fabricante 1. Em cada um dos fabricantes, os provetes brancos apresentam maior valor de velocidade de propagação do que os provetes vermelhos.

Em todos os provetes não hidrofugados, vermelhos ou brancos, a velocidade de ultra-sons aumenta nos provetes após os ciclos de nevoeiro salino e antes da dessalinização, face aos provetes novos.

Nos provetes hidrofugados do fabricante 1 que se degradaram, também se verificou um aumento da velocidade de ultra-sons após os ciclos e antes da dessalinização. Os que não sofreram degradação visível tiveram um aumento de velocidade muito ligeiro (em dois provetes) ou mesmo uma ligeira diminuição de velocidade (no terceiro provete sem degradação visível).

Nos provetes hidrofugados do fabricante 2, que não sofreram degradação visível, a velocidade manteve-se quase estável, com diminuição ligeira em quatro provetes e pequeno aumento no restante.

Após dessalinização a velocidade de transmissão de ultra-sons diminui para valores inferiores aos dos provetes novos, com excepção de um provete branco do fabricante 1, de dois provetes hidrofugados do fabricante 2 (que não sofreram degradação visível) e de um provete do modelo T2 do fabricante 2, cujas velocidades antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado são iguais.

5.6.8 Porosimetria de mercúrio

De alguns tipos de provetes degradados, depois de dessalinizados, foram retiradas amostras que foram submetidos ao ensaio de porosimetria de mercúrio baseado na norma norte-americana ASTM D 4404 [68], para determinar a sua estrutura porosa. É assim possível comparar a estrutura porosa dos provetes degradados com a estrutura porosa de amostras não degradadas, retiradas das mesmas telhas.

O ensaio foi realizado num porosímetro de mercúrio marca Quantachrome, modelo Autoscan 60.

Os provetes foram secos em estufa ventilada a 60 °C e de seguida arrefecidos em exsiccador. Após serem partidos, para caberem na célula de ensaio (penetrómetro), foram colocados no porosímetro de mercúrio.

O ensaio foi constituído pelas seguintes operações: degasificação do provete, enchimento da célula de ensaio com mercúrio e pressurização.

Os parâmetros de ensaio foram os seguintes:

γ - tensão superficial do mercúrio: 0,480 N/m

θ - ângulo de contacto entre o mercúrio e a parede do poro: 147,10°

Densidade do mercúrio 13,5340 g/cm³

Célula de 5,3 cm³

Apresentam-se na Figura 186 os resultados do ensaio na forma de um gráfico com as curvas de distribuição das dimensões dos poros de amostras de provetes novos e de amostras de provetes degradados.

Em geral a deterioração não provocou grande alteração na porosimetria dos provetes ensaiados. Possivelmente a degradação obtida nos ensaios acelerados foi apenas superficial, não induzindo alterações detectáveis pelo ensaio de porosimetria realizado sobre amostras de provetes que após sujeição aos ciclos de nevoeiro/secagem foram pincelados e dessalinizados.

É de referir que no caso do provete branco do fabricante 1 (F1 B) foi detectado um aumento do volume de poros com dimensões de 0,2 μm a 0,4 μm face ao provete novo, à custa da diminuição do volume de poros com raio superior a 0,4 μm . Os provetes F1 B foram os provetes não hidrofugados que mais se degradaram no ensaio acelerado.

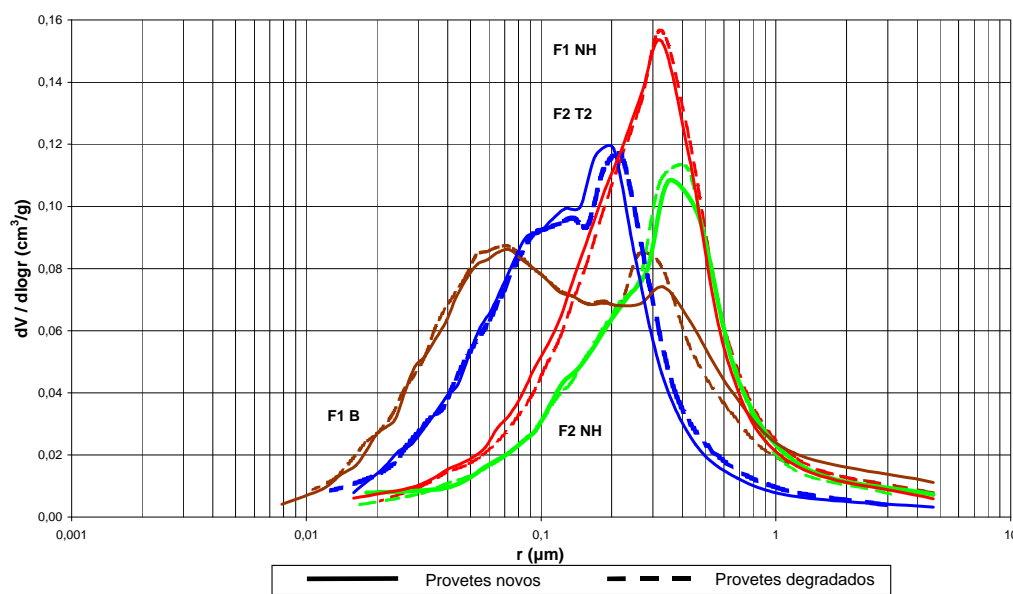


Figura 186 - Porosimetria de mercúrio de provetes novos e de provetes degradados

5.6.9 Teor de humidade higroscópica (HMC) e perfis de teor salino

Para determinar a que profundidade acontece a cristalização dos sais foram obtidos perfis de teor de sais em amostras provenientes de provetes submetidos a envelhecimento acelerado de dois tipos de telhas do fabricante 2. Os perfis foram obtidos através do método da determinação do teor de humidade higroscópica (hygroscopic moisture content - HMC) [81].

De entre os provetes sujeitos a 30 ciclos de nevoeiro salino/secagem que não foram dessalinizados foram seleccionados um provete do tipo F2 T3 NH e outro do tipo F2 B. Por corte a seco foi obtida uma amostra C1 de cada um dos provetes (Figura 187).

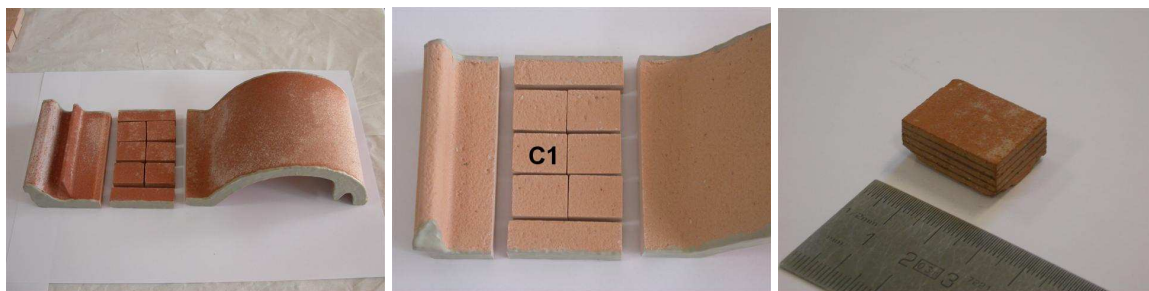


Figura 187 - Amostras C1

Em cada uma das amostras C1 foram marcadas cinco camadas e foram obtidas por lixagem cinco amostras em forma de pó para ensaio. Cada amostra foi designada, desde a face superior até à face inferior, por C1 A, C1 B, C1 C, C1 D e C1 E. Foram também usadas amostras de controlo, umas constituídas por cloreto de sódio, e outras constituídas por pó obtido por lixagem de provetes novos de cada um dos dois tipos de telha considerados (Figura 188).



Figura 188 - Camadas reduzidas a pó e amostras de controlo

Todas as amostras foram secas a 60 °C e de seguida colocadas numa câmara climática à temperatura de 20 °C e a 85 % de humidade relativa. A massa dos provetes foi determinada periodicamente até estabilizar e a seguir foram calculados os teores de humidade higroscópica (HMC) de cada uma das amostras.

A Figura 189 mostra o teor de humidade higroscópica (HMC) ao longo do tempo das cinco camadas (Figura 188) de cada uma das amostras C1 (Figura 187) obtidas dos provetes F2 T3 NH 7 C e F2 B 4 C sujeitos ao envelhecimento acelerado e antes de dessalinizados.

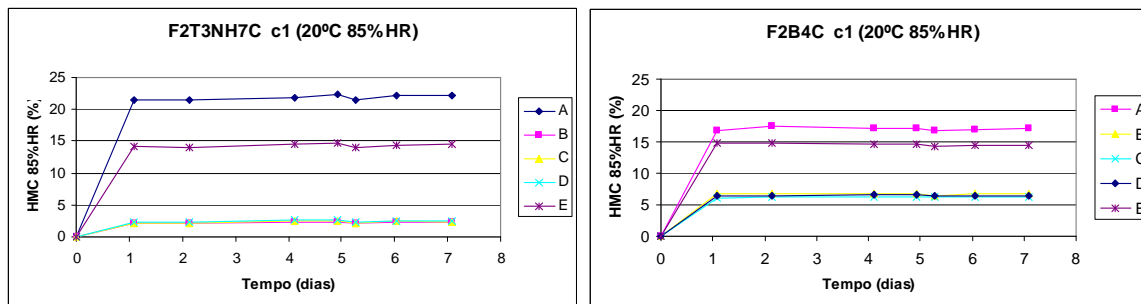


Figura 189 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das camadas A, B, C, D e E

Na Figura 190 são apresentados o mesmo HMC ao longo do tempo das amostras transformadas em pó mas agora juntamente com o HMC das amostras de controlo de cloreto de sódio (Figura 188). A Figura 191 representa o HMC ao longo do tempo das amostras de controlo constituídas por pó de provetes novos (Figura 188).

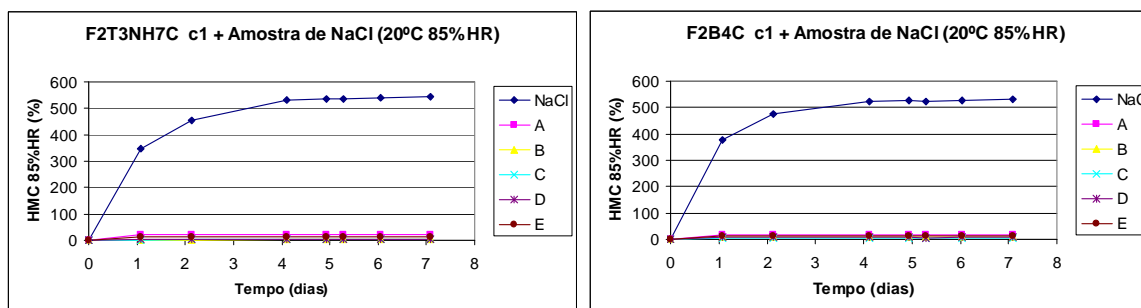


Figura 190 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das camadas e das amostras de NaCl

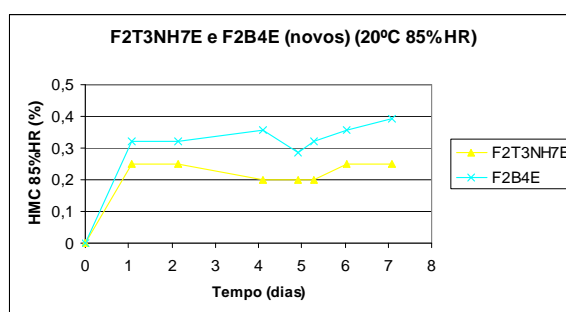


Figura 191 - Teor de humidade higroscópica (HMC) das amostras de provetes novos

A partir dos valores do HMC no dia 7 foi calculado o teor de NaCl de cada camada (Quadro 102).

Quadro 102 - Teor de NaCl

Camada	Teor de NaCl [%]	
	F2 T3 NH	F2 B
A	4,0	3,1
B	0,4	1,2
C	0,4	1,1
D	0,4	1,1
E	2,6	2,7

Nos dois tipos de amostras C1 o teor de NaCl é muito maior nas camadas superficiais (A e E). Nas camadas interiores do provete branco (F2 B) o teor é maior do que nas camadas interiores do provete vermelho (F2 T3 NH).

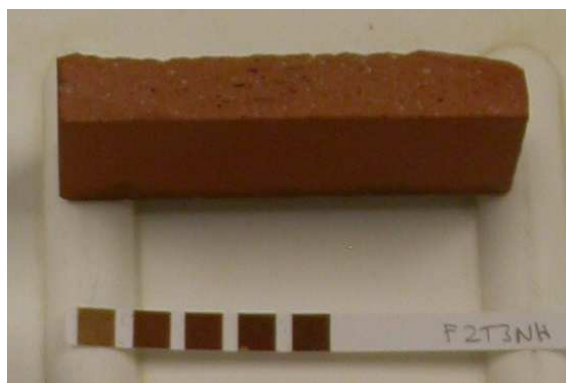
5.6.10 Colorimetria

Foram realizados diversos ensaios com tiras colorimétricas para averiguar a presença de alguns compostos químicos em provetes novos e em provetes que tinham sido sujeitos ao ensaio acelerado de nevoeiro salino/secagem.

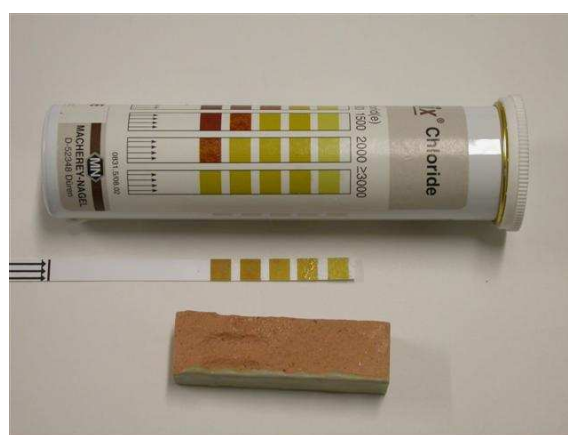
Na Figura 192 podem ver-se aspectos de ensaios realizados com as tiras colorimétricas sensíveis a cloretos. É evidente a diferença da cor das tiras após contacto com o provete novo, onde não foi detectada a presença de cloretos, e após contacto com os provetes sujeitos ao ensaio acelerado, onde foram detectados cloretos.

Na Figura 193 apresenta-se os resultados de ensaios realizados com tiras colorimétricas sensíveis a sulfatos e a nitratos. Estes ensaios foram sempre negativos.

Como era expectável as tiras colorimétricas apenas detectaram a presença de cloretos nos provetes sujeitos ao ensaio acelerado, não o tendo detectado nos provetes novos. Não foi detectada a presença de sulfatos ou de nitratos nos provetes novos nem nos provetes degradados.



Provete novo



Provetes após ensaio acelerado de nevoeiro salino/secagem

Figura 192 - Ensaio com tiras colorimétricas sensíveis a cloretos



Tira colorimétrica sensível a sulfatos



Tira colorimétrica sensível a nitratos

Figura 193 - Ensaio com tiras colorimétricas sensíveis a sulfatos e a nitratos

5.6.11 Análise dos resultados dos ensaios sobre provetes sujeitos ao ensaio cíclico de envelhecimento acelerado

Os ensaios cíclicos de envelhecimento acelerado de nevoeiro salino/secagem provocaram nos oito tipos de provetes vários tipos e níveis de degradação, no entanto ao fim de 30 ciclos o nível de degradação foi baixo ou médio na maior parte dos provetes.

Os provetes brancos tiveram um maior grau de degradação, sendo só suplantados por alguns dos provetes vermelhos hidrofugados. Estes apresentaram maior degradação porque a solução salina atingiu o seu interior e ocorreu cristalização sob a camada superficial hidrofugada, que empolou e acabou por se destacar.

A variação de massa dos provetes foi nula ou muito baixa, não conseguindo quantificar os diversos níveis de degradação atingidos, com excepção dos provetes hidrofugados que apresentaram maior degradação (-0,9 % e -3,5 %).

Os provetes hidrofugados do fabricante 1 sujeitos a 20 e a 30 ciclos apresentaram um aumento significativo da absorção de água por imersão face à absorção que tinham antes do envelhecimento acelerado.

Para os restantes tipos de provetes a degradação atingida ao fim de 30 ciclos não é quantificável pela variação da absorção de água por imersão nem pela variação das características determinadas pelo ensaio de absorção de água sob vácuo nem pela absorção de água por contacto superficial de esponja.

A absorção de água por imersão dos provetes hidrofugados do fabricante 2 não aumentou em consequência dos ensaios acelerados, o que quer dizer que o hidrofugante manteve a sua eficácia. A absorção de água sob vácuo destes provetes é muito superior à sua absorção de água por imersão, tendo valores equivalentes aos dos provetes idênticos não hidrofugados. Isto é devido ao produto hidrofugante não preencher os poros onde se encontra e portanto não impede que a água sob pressão impregne os poros abertos dos provetes.

Após o ensaio acelerado e antes da dessalinização, a velocidade de transmissão de ultra-sons é maior face à dos provetes novos, nos casos em que ocorreu degradação visível. Isto pode ser devido aos cristais salinos que, ao preencherem os poros, dão maior continuidade ao material sólido, permitindo uma mais rápida propagação dos ultra-sons. Em geral, após dessalinização, a velocidade de transmissão de ultra-sons diminuiu para valores inferiores aos dos provetes novos, possivelmente devido a alguma destruição da estrutura porosa motivada pela cristalização dos sais.

A porosimetria de mercúrio dos provetes após os 30 ciclos do ensaio acelerado é igual à porosimetria dos provetes novos, o que quer dizer que o nível de degradação atingido não alterou a estrutura porosa do material que ficou nos provetes após limpeza do material degradado solto.

Os perfis de teor de sal mostraram maior concentração de cloreto de sódio nas camadas exteriores, na face superior e na face superior dos provetes, especialmente no caso do provete vermelho ensaiado.

Os testes com tiras colorimétricas apenas detectaram a presença de cloretos nos provetes sujeitos aos ensaios acelerados e não detectaram essa presença nos provetes novos. Não foi detectada a presença de sulfatos ou de nitratos nos provetes novos nem nos provetes degradados.

5.7 Avaliação das consequências do envelhecimento acelerado

Os ensaios de envelhecimento acelerado realizados na câmara climática de nevoeiro salino induziram diversos tipos e níveis de degradação aos oito tipos diferentes de provetes ensaiados. Foram realizados ensaios cíclicos sobre todos os tipos de provetes e um ensaio composto sobre os provetes não hidrofugados.

O nível de degradação foi baixo ou médio na maior parte dos provetes sujeitos aos 10, 20 e 30 ciclos durante os quais decorreu o ensaio cíclico. Em geral observou-se que a degradação evoluía nos primeiros ciclos e a partir de certa altura o nível de degradação

estabilizava. O que quer dizer que dificilmente se obteriam maiores níveis de degradação apenas prolongando o número de ciclos.

Os provetes não hidrofugados apresentaram níveis de degradação baixos ou médios e principalmente nas formas de picamento, desagregação granular e escamação. Os provetes brancos de ambos os fabricantes foram os que se degradaram mais.

A maioria dos provetes hidrofugados não apresentou degradação visível, no entanto aqueles que se degradaram atingiram tipos de degradação mais extensos como plaquetas e níveis superiores de degradação.

Enquanto os provetes não hidrofugados começaram a apresentar degradação visível ao fim dos primeiros ciclos do ensaio, os provetes hidrofugados mantinham-se aparentemente sem degradação. Os primeiros sinais de degradação visível apareceram sob a forma de empolamento que foi evoluindo e deu origem à formação de plaquetas.

A degradação dos provetes hidrofugados passou a ser possível quando a solução salina conseguiu atingir o material sob a camada hidrofugada, e a partir de então foi na interface material não hidrofugado - material hidrofugado que passou a ocorrer a cristalização dos sais. A pressão decorrente dessa cristalização foi aumentando e deu origem ao empolamento inicial e à sua expansão até atingir áreas substanciais da superfície dos provetes. Finalmente a degradação manifestou-se pela perda de uma grande quantidade de material.

Em geral as variações de massa dos provetes provocadas pelos ensaios cíclicos não foram significativas e não quantificam a degradação atingida, com exceção dos provetes hidrofugados que se degradaram. Apesar de os valores serem muito pequenos foram as telhas brancas de ambos os fabricantes as que apresentaram maior perda de massa, correspondendo a uma maior degradação observada.

Com exceção dos provetes hidrofugados do fabricante 1, a degradação atingida ao fim de 30 ciclos do ensaio cíclico não é quantificável por variações dos valores das diversas características hídricas determinadas antes e após o ensaio acelerado.

No caso dos provetes hidrofugados do fabricante 1 detectou-se uma diferença de comportamento entre o provete sujeito a 10 ciclos e os restantes provetes, sujeitos a 20 ciclos e a 30 ciclos. A absorção de água por imersão do provete sujeito a 10 ciclos não aumentou, o que quer dizer que o produto hidrofugante manteve a sua eficácia. Em todos os restantes provetes a absorção de água aumentou significativamente, para os níveis de absorção de água dos provetes não hidrofugados desse fabricante.

Em geral resultou do ensaio acelerado a diminuição da velocidade de transmissão de ultra-sons, possivelmente devido a alguma destruição da estrutura porosa motivada pela cristalização dos sais. No entanto não se encontrou correspondência entre os diversos níveis dessa diminuição e as diferenças de degradação visual identificadas. Uma explicação possível pode dever-se ao facto de a degradação ser mais superficial do que interna e, ao perder-se parte da camada superficial, alguma dessa degradação já não ser detectada pelo ensaio.

A porosimetria dos quatro tipos de telhas que foram ensaiadas no porosímetro de mercúrio não foi alterada pelos 30 ciclos do ensaio cíclico. Os provetes F1 B e F2 T2 NH, que tinham um maior intervalo de dimensões de poros, foram aqueles que sofreram maior degradação. Os provetes F1 NH e F2 NH, com poros maiores e com um intervalo menor e mais homogêneo de dimensões de poros, apresentaram menor grau de degradação.

Os perfis de teor de sal ao longo da espessura dos provetes mostraram grande concentração de cloreto de sódio nas camadas exteriores, na face superior e na face superior dos provetes, especialmente no caso do provete vermelho ensaiado. Estes cristais podem ser inofensivos se estiverem sobre a superfície, mas podem provocar degradação caso se concentrem sob uma camada superficial muito fina de material, que pode ser facilmente destacada. A concentração de sais nas camadas superficiais pode indicar a possibilidade da ocorrência de deterioração.

Na tentativa de atingir maiores níveis de degradação nos ensaios acelerados de nevoeiro salino em câmara climática foi concebido um ensaio designado por ensaio composto. A definição deste ensaio composto foi baseada no comportamento dos provetes durante o ensaio cíclico e nos resultados obtidos neste ensaio. As durações das diversas fases do ensaio composto também foram definidas tendo em conta as observações do comportamento dos provetes ao longo do ensaio composto.

No ensaio composto a temperatura da câmara foi aumentada e as fases cíclicas foram intercaladas com períodos prolongados de secagem. Também se procedeu a pincelagem a seco e a húmido dos provetes em determinados momentos do ensaio. Em consequência deste ensaio os provetes apresentaram maiores níveis de degradação.

CAPÍTULO 6 CONTRIBUIÇÃO PARA A DURABILIDADE DE TELHAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

6.1 Análise dos ensaios de envelhecimento acelerado

A degradação obtida nos ensaios acelerados foi comparada com a degradação sofrida por telhas sujeitas a exposição natural através da observação de casos reais (descritos em 2.4) em que já tinha acontecido degradação.

Os tipos de degradação obtidos nos ensaios acelerados, analisados em 5.5, são similares aos observados nos casos de degradação natural apresentados em 2.4.

O estudo de oito tipos diferentes de telhas e a sua caracterização e os resultados diferenciados que foi possível obter nos ensaios acelerados de nevoeiro salino permitiram identificar características e propriedades que poderão influenciar na durabilidade das telhas cerâmicas sujeitas à exposição em ambiente marítimo.

Um primeiro factor identificado foi a matéria-prima: o teor de CaO da argila utilizada (maior na telhas brancas que nas vermelhas) mostrou influenciar a durabilidade face aos sais.

Entre as telhas não hidrofugadas as brancas apresentaram maiores níveis de degradação do que as telhas vermelhas sujeitas ao mesmo número de ciclos. As telhas brancas têm maior absorção de água sob vácuo e maior porosidade do que as vermelhas do mesmo fabricante, embora nem sempre mostrem maior absorção de água por imersão.

Assim, obtiveram-se diferenças de comportamento entre as telhas vermelhas e as brancas, verificando-se que a absorção de água sob vácuo e a porosidade podem dar informações importantes para além da absorção de água por imersão, ensaio comumente utilizado para caracterizar as telhas cerâmicas.

A estrutura porosa obtida pela porosimetria de mercúrio também mostrou características diferentes nos provetes ensaiados. Os provetes com maior intervalo de dimensões de poros (caso dos F1 B e F2 T2 NH) apresentaram maior degradação do que aqueles com poros maiores e intervalo de dimensões de poros mais reduzido (F1 NH e F2 NH). Os provetes F1 B, que sofreram o maior grau de degradação de todas as não-hidrofugadas, foram os únicos a apresentar uma estrutura porosa bimodal.

A hidrofugação foi um segundo factor identificado com influência significativa na durabilidade.

As telhas hidrofugadas podem resistir mais tempo em ambiente salino, mas se a solução salina conseguir atravessar a camada hidrofugada devido a defeito desta ou à sua perda de eficácia ao longo do tempo, a cristalização dos sais ocorrerá sob a camada hidrofugada, provocando empolamentos seguidos de destaque dessa camada e perda de muito maior quantidade de material em menor espaço de tempo do que no caso das telhas não hidrofugadas.

Um terceiro factor identificado foi a tecnologia de fabrico. Os provetes que se comportaram melhor correspondem às telhas cujas tecnologias de fabrico são as mais recentes. Daí se poderá dizer que um maior controlo das matérias-primas, maior temperatura de cozedura e maior homogeneidade de temperatura de cozedura dentro dum mesmo lote e mesmo em redor de todas as faces de cada telha, possibilitadas pela colocação das telhas em suportes individuais e afastadas entre si, são importantes para se obter produtos com maior qualidade, maior homogeneidade de características por lote e maior durabilidade. Os moldes usados nas técnicas mais avançadas de fabrico permitem a obtenção de superfícies mais lisas e compactas e arestas mais vivas que contribuem também para melhor comportamento ao nevoeiro salino.

Para o mesmo tipo de matéria-prima verificou-se que com maiores temperaturas de cozedura se obtêm telhas com menor absorção de água e melhores durabilidades.

6.2 Contribuição para a melhoria do fabrico das telhas

Tendo em conta o observado nos ensaios acelerados e os parâmetros identificados é possível desde já fornecer algumas indicações que poderão conduzir a uma maior durabilidade das telhas cerâmicas em ambiente marítimo.

Relativamente ao processo de fabrico será sempre importante manter um controlo das características e estado das matérias-primas.

A tecnologia de moldagem das telhas tem vindo a evoluir no sentido de obter superfícies e arestas o mais perfeitas possível. A zona de contacto dos dois moldes pode originar descontinuidades na superfície das telhas, onde podem ocorrer fissuras. A presença da solução salina e a cristalização de sais nessas fissuras pode aumentar as dimensões das fissuras e dar origem a fracturas e a lascagem com a consequente perda de material. A utilização de moldes perfeitos e bem ajustados e a sua substituição quando o desgaste ultrapassar certos limites pode evitar estes fenómenos.

A utilização de suportes individualizados para colocar as telhas nos vagões que as transportam durante a secagem e cozedura permite a passagem de ar entre as telhas e a distribuição homogénea da temperatura em todas as superfícies de cada telha e em todas as telhas. Assim se evitam possíveis deformações decorrentes do fabrico e se obtém maior constância de propriedades nas telhas e nos lotes.

A definição da curva de cozedura das telhas e o seu controlo eficaz durante a cozedura é muito importante para se obterem telhas com características que lhes atribuem durabilidade sob a acção do nevoeiro salino. Para o mesmo tipo de matérias-primas quando são atingidas temperaturas superiores obtêm-se materiais cerâmicos cozidos mais vitrificados e portanto com menor absorção de água. A definição dos tempos de passagem no forno, da velocidade de aumento ou diminuição da temperatura e da duração dos patamares de temperatura constante depende das matérias-primas e influenciam as transformações que a pasta sofre durante a cozedura e as propriedades finais do material cozido.

No caso das telhas designadas de brancas o maior teor de óxido de alumínio das matérias-primas, que é mais refractário, exige maiores temperaturas de cozedura. Também para se obter a cor creme destas telhas são necessárias maiores temperaturas para que o carbonato de cálcio das matérias-primas dê origem ao óxido de cálcio que reage com o ferro e assim atenua fortemente a cor vermelha.

Se se optar por hidrofugar as telhas cerâmicas há que ter em atenção vários aspectos, sendo os mais importantes a sua eficácia inicial da hidrofugação e a manutenção dessa eficácia ao longo do tempo.

Como se viu, se a solução salina tiver acesso ao interior não hidrofugado da telha, vai ocorrer cristalização de sais sob a camada de material hidrofugado.

Para evitar que isso aconteça há que garantir que todas as superfícies da telha estão hidrofugadas, ou seja, há que garantir a existência de uma certa espessura de material hidrofugado em qualquer ponto da superfície da telha. Será portanto de evitar a hidrofugação de apenas uma das faces da telha.

Relativamente à manutenção da eficácia da hidrofugação ao longo do tempo os factores que a influenciam são a própria durabilidade do produto hidrofugante e o estado de degradação da camada hidrofugada.

Deve ser estudada a durabilidade dos produtos hidrofugantes face às acções atmosféricas, como a temperatura e a radiação ultra-violeta.

Ao longo do tempo de serviço as telhas estão sujeitas a acções físicas de que podem resultar fissuras e outras degradações superficiais. Quando estas alterações afectarem nalgum ponto toda a camada hidrofugada fica então o interior da telha acessível à solução salina.

Há que estudar o custo/benefício de diferentes espessuras da camada hidrofugada.

A solução mais cara será tentar hidrofugar toda a espessura da telha e portanto toda a sua massa. Neste caso evitam-se os problemas de cristalização de sais sob as camadas hidrofugadas, quando a solução salina tem acesso ao interior não hidrofugado das telhas.

No caso comum da hidrofugação ser superficial há que garantir que todas as superfícies da telha ficam eficientemente hidrofugadas. Uma forma relativamente expedita de avaliar o sucesso da operação de hidrofugação inicial será submeter um número representativo de telhas hidrofugadas ao ensaio de imersão em água fria durante 48 horas.

A decisão quanto à espessura da camada hidrofugada deve ter em conta os seguintes aspectos:

- Camadas de material superficial hidrofugado mais espessas requerem maior gasto de hidrofugante mas poderão manter a eficácia da hidrofugação durante mais tempo. No entanto, caso a solução salina atinja o interior não hidrofugado da telha, a cristalização de sais ocorrerá a maior profundidade, sob a camada hidrofugada, e se ocorrer degradação esta acabará por se manifestar pela perda de maior quantidade de material.
- Camadas mais finas de material hidrofugado necessitam de menor quantidade de hidrofugante e portanto ficam mais baratas. Nestes caso a eficácia da camada hidrofugada poderá durar menos tempo, mas quando a solução salina aceder ao interior da telha a cristalização subsequente de sais sob a camada hidrofugada será mais próxima da superfície e a degradação afectará menor espessura de material.

É desaconselhada a aplicação de produtos hidrofugantes nos trabalhos de manutenção ou reabilitação de telhados expostos a nevoeiro salino. Nestes casos é de prever que as telhas já estejam contaminadas com sal. A aplicação destes produtos por aspersão dos telhados abrange a face visível das telhas e com pouca ou nenhuma eficácia a zona das juntas de sobreposição das telhas. A entrada de água através das zonas não hidrofugadas pode fazer chegar humidade ao interior das telhas que pode dissolver os sais, e transportá-los para a zona sob a camada hidrofugada, onde poderá ocorrer a sua cristalização aquando da secagem e assim a potencial ocorrência de forte degradação.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES

7.1 Conclusões gerais

Os ensaios de envelhecimento acelerado realizados na câmara climática de nevoeiro salino induziram diversos tipos e níveis de degradação aos oito tipos diferentes de provetes ensaiados. Isto permite utilizar este tipo de ensaio acelerado para detectar diferenças de comportamento face ao nevoeiro salino entre provetes de telhas diferentes.

Os tipos de degradação obtidos nos ensaios acelerados são dos mesmos tipos das observadas nos casos de degradação natural estudados. Este é um resultado muito importante com vista à simulação em laboratório de problemas reais e que permitirá realizar estudos paramétricos com o objectivo de melhorar a durabilidade das telhas cerâmicas em ambiente marítimo.

A degradação provocada pelo nevoeiro salino é principalmente causada pela cristalização de sais e pelo aumento do seu volume que promove a destruição da estrutura porosa.

O comportamento similar de telhas inteiras e de fragmentos do mesmo tipo de telhas sujeitos a ensaios cíclicos justifica a possibilidade de utilização de provetes retirados de telhas nos ensaios acelerados de nevoeiro salino.

Os provetes têm que ser representativos das telhas a estudar e portanto devem ser constituídos por um troço transversal da telha de modo a incluir toda a largura da sua superfície, incluindo os bordos laterais do troço. Assim contêm possíveis descontinuidades da superfície decorrentes das juntas dos moldes ou da geometria complexa da superfície.

Foram desenvolvidos e realizados vários tipos de ensaios acelerados. Os resultados obtidos em cada um dos ensaios forneceram informações que contribuíram para alterações dos procedimentos. Essas alterações foram testadas nos ensaios seguintes.

Os resultados dos ensaios cíclicos preliminares permitiram seleccionar os ciclos mais curtos de 24 horas (8 horas de nevoeiro salino + 16 horas de secagem) em alternativa a ciclos mais demorados de 48 horas (10 horas de nevoeiro salino + 38 horas de secagem), o que reduz para metade a duração de estudos que envolvam a realização deste tipo de ensaios cíclicos.

No ensaio cíclico, constituído por um máximo de 30 ciclos, o nível de degradação foi baixo ou médio na maior parte dos provetes. De um modo geral, as variações de massa foram reduzidas, não quantificando a degradação observada. No entanto houve perda de massa nos casos em que a degradação foi maior, o que leva a supor que para níveis ainda superiores de degradação já se poderão obter distintos níveis de perda de massa.

Tendo-se já atingido o objectivo de obter diferentes tipos e níveis de degradação em provetes diferentes, pretendeu-se atingir um maior nível de degradação dos provetes sujeitos aos ensaios de envelhecimento.

Para obter maiores níveis de degradação foi desenvolvido e realizado outro ensaio, designado de ensaio composto, com as seguintes alterações face aos anteriores: temperatura superior na câmara de nevoeiro salino, fase de secagem contínua de grande duração entre as fases cíclicas de nevoeiro/secagem, pincelagem a seco dos provetes após fases cíclicas, molhagem e pincelagem a húmido dos provetes após fase cíclica. Neste ensaio composto também se obtiveram diferentes tipos e níveis de degradação nos vários tipos de provetes ensaiados, tendo-se atingido, em geral, maiores níveis de degradação do que nos ensaios cíclicos anteriores.

Este ensaio permitiu verificar que há determinadas condições climáticas que condicionam a degradação das telhas, como sejam períodos prolongados de secagem, que aceleram a cristalização de sais; períodos de chuva e vento que possibilitam a limpeza de eventuais películas de sal superficiais e expõem uma superfície degradada à acção subsequente de nevoeiro salino.

A inspeção visual e a velocidade de propagação de ultra-sons podem ser adequadas para avaliar a degradação devida ao nevoeiro salino.

O ensaio de ultra-sons, não destrutivo e realizável *in situ*, conjugado com uma observação cuidada, pode dar algumas indicações acerca do estado de telhas, pelo menos a título comparativo. Com efeito, nos ensaios *in situ* realizados em tempo seco é previsível que as telhas com velocidades de ultra-sons mais elevadas correspondam às que contêm maiores teores de sais cristalizados. Pelo contrário, após chuvadas fortes, poderão verificar-se velocidades mais baixas nas telhas cuja estrutura porosa sofreu maior destruição, dado que é provável que a chuva tenha dissolvido os cristais salinos que colmataram os poros logo após a cristalização.

No caso de telhas hidrofugadas, o ensaio de absorção de água por imersão pode ser utilizado para verificar a manutenção da eficácia do hidrofugante. A perda desta eficácia pode ser consequência de diversos factores, entre os quais efeitos decorrentes do nevoeiro salino, e permite antever a ocorrência de degradação decorrente da cristalização de sais sob a camada hidrofugada.

Os provetes brancos apresentaram um maior grau de degradação, demonstrando que a matéria-prima, nomeadamente teores elevados de CaO, tem influência na durabilidade das telhas.

Alguns dos provetes vermelhos hidrofugados apresentaram maior grau de degradação do que os provetes brancos porque a solução salina atingiu o seu interior e ocorreu cristalização sob a camada superficial hidrofugada, que empolou e acabou por se destacar.

Em serviço as telhas hidrofugadas podem resistir mais tempo ao nevoeiro salino do que as não hidrofugadas, no entanto podem sofrer maior degradação se houver algum defeito na camada hidrofugada ou se esta perder eficácia ao longo do tempo, o que permitirá o acesso dos sais ao seu interior.

As tecnologias de fabrico também contribuem para a durabilidade. O controlo das matérias-primas, maior temperatura de cozedura, temperatura mais homogénea em todas as telhas colocadas na mesma zona do forno, sujeição de todas as faces de cada telha à mesma temperatura e a utilização de moldes que permitam obter superfícies mais lisas e arestas mais vivas permitem fabricar telhas com melhor resistência ao nevoeiro salino.

Os oito tipos de telhas estudados foram caracterizados através de ensaios que demonstraram que as telhas têm propriedades diferentes. Estas diferenças poderão explicar os diferentes comportamentos face aos ensaios de envelhecimento acelerado e permitem identificar parâmetros que podem contribuir para melhorar a durabilidade das telhas.

A absorção de água por imersão dos provetes hidrofugados é inferior à dos provetes não hidrofugados, como pretendido. Os provetes hidrofugados que se degradaram no ensaio cíclico tinham maior absorção de água antes do ensaio, o que demonstra menor eficácia inicial da hidrofugação desses provetes.

A absorção de água por imersão e sob vácuo é maior nos provetes não hidrofugados do fabricante 1 do que nos provetes não hidrofugados do fabricante 2.

Em cada fabricante, os provetes não hidrofugados com maiores absorções de água por imersão são os vermelhos do fabricante 1 e os vermelhos do modelo 2 do fabricante 2.

Os provetes brancos de cada fabricante têm maior absorção de água sob vácuo e maior porosidade do que os provetes vermelhos não hidrofugados do mesmo fabricante.

Como os maiores níveis de degradação foram atingidos pelos provetes brancos, a absorção de água sob vácuo e a porosidade são propriedades a ter em conta na avaliação comparativa da durabilidade de telhas cerâmicas, e não apenas a absorção de água por imersão.

Nas duas condições de imersão os provetes não hidrofugados com menor absorção são os vermelhos do modelo 3 do fabricante 2 e os vermelhos do modelo 1 do mesmo fabricante.

As diversas velocidades de transmissão de ultra-sons obtidas nos provetes novos indiciam que os diversos tipos de telhas têm diferentes características mecânicas. Existe alguma relação entre a menor absorção de água por imersão e uma maior velocidade de propagação de ultra-sons.

A estrutura porosa de alguns provetes novos e degradados foi determinada utilizando o porosímetro de mercúrio. Os resultados mostraram que a distribuição do tamanho de poros é diferente entre os diversos provetes novos.

Os provetes com um maior intervalo de dimensão de poros foram os que apresentaram maior degradação. Os provetes com poros maiores e com um intervalo menor e mais homogêneo de dimensões de poros apresentaram menor grau de degradação.

A porosimetria de mercúrio dos provetes após os 30 ciclos do ensaio acelerado é igual à porosimetria dos provetes novos, o que quer dizer que o nível de degradação atingido não alterou a estrutura porosa do material que ficou nos provetes após limpeza do material degradado solto.

Os perfis de teor de sal ao longo da espessura dos provetes, determinados utilizando o método HMC em dois tipos de provetes degradados nos ensaios cíclicos, mostraram grande concentração de sais nas camadas superficiais das faces superior e inferior dos provetes. Os cristais podem ser inofensivos se estiverem à superfície, mas podem provocar danos caso se concentrem sob camada superficial muito fina.

Quase todos os provetes hidrofugados do fabricante 1 apresentaram um aumento significativo da absorção de água por imersão como consequência do ensaio acelerado. Para os restantes provetes a degradação atingida ao fim de 30 ciclos do ensaio cíclico não foi quantificável por variações dos valores das diversas características hídricas determinadas antes e após o ensaio acelerado.

Em geral, após o ensaio acelerado e após dessalinização, a velocidade de transmissão de ultra-sons diminuiu para valores inferiores aos dos provetes novos, o que depreende uma diminuição da resistência mecânica.

Possivelmente essa diminuição teria sido devida a alguma destruição da estrutura porosa motivada pela cristalização dos sais; no entanto não se encontrou correspondência entre os diversos níveis dessa diminuição e as diferenças de degradação visual identificadas. Uma explicação possível pode ser a da degradação ser mais superficial do que interna. Ao perder-se parte da camada superficial alguma da degradação já não é detectada no ensaio.

7.2 Análise do cumprimento dos objectivos

Foi demonstrada a adequabilidade de ensaios de envelhecimento artificial acelerado para avaliação da durabilidade das telhas em ambiente marítimo. Os ensaios desenvolvidos e realizados permitiram obter diferentes graus de degradação em diferentes tipos de telhas, os tipos de degradação decorrentes dos ensaios acelerados são comparáveis aos observados em casos de degradação natural.

O ensaio composto realizado simula várias acções climáticas e aumentou significativamente o grau de alteração. Neste ensaio foi aumentada a temperatura de funcionamento da câmara, o que aumentou a secagem dos provetes durante a secagem e induziu maior degradação logo na primeira fase cíclica. Entre as fases cíclicas foram introduzidos períodos prolongados de secagem, o que permitiu secar ainda mais os provetes e levou ao aumento da degradação na fase cíclica subsequente.

Neste ensaio composto a superfície dos provetes foi pincelada a seco para simular o efeito do vento. Os provetes também foram molhados e pincelados com pincel molhado para simular o efeito do vento e da chuva na superfície das telhas. Estas operações promoveram a limpeza das superfícies e maior exposição ao nevoeiro nas fases cíclicas seguintes, o que nalguns casos alterou o tipo e o grau de degradação dos provetes.

As características das telhas que são mais afectadas inicialmente pela exposição ao ambiente marítimo são o aspecto e a resistência mecânica.

Foi possível identificar alguns parâmetros que podem influenciar a degradação das telhas de barro vermelho em ambiente marítimo, tendo em consideração o comportamento dos diversos tipos de telhas durante os ensaios de envelhecimento acelerado:

- A matéria-prima influencia a durabilidade das telhas, já que as telhas designadas brancas apresentaram mais degradação.
- Verificou-se que o comportamento das telhas hidrofugadas pode ser pior do que o das telhas não hidrofugadas.
- As telhas não hidrofugadas com melhor comportamento foram as produzidas com as tecnologias mais modernas de moldagem, com uma melhor homogeneidade de cozedura decorrente do tipo de empilhamento das telhas nos carros que as transportam, e cozidas a maiores temperaturas, ficando assim com menor absorção de água.
- O controlo da curva de cozedura a que as telhas são sujeitas durante a cozedura é importante para obter telhas com as características requeridas.
- Os provetes com estrutura porosa com uma gama alargada de dimensões de poros apresentaram maior degradação.

Tendo-se conseguido encontrar alguma relação entre as características e os parâmetros dos tipos de telhas estudados e o seu comportamento durante os ensaios acelerados, será possível prever a durabilidade relativa de diversos tipos de telhas a partir do conhecimento da relação de algumas características como a absorção de água, a porosidade e a cor.

7.3 Desenvolvimentos futuros

Na sequência deste estudo identificaram-se vários aspectos que poderão ser desenvolvidos no futuro.

Em complemento dos ensaios já realizados sobre os provetes, podem ser avaliadas por microscopia electrónica as suas características físicas, químicas e microestruturais para analisar os locais onde se dá a cristalização de sais e perceber os mecanismos de degradação.

Os locais em que os sais cristalizam devem ser comparados com os resultados dos ensaios HMC já realizados e a realizar sobre os restantes tipos de provetes.

De cada tipo de molde utilizado resultam telhas com superfícies diferentes. Estas superfícies podem ser melhor caracterizadas, pode ser determinada a sua rugosidade e avaliada a influência na durabilidade das telhas.

Devem ser caracterizados os hidrofugantes utilizados, determinada a profundidade que atingem e avaliada a sua durabilidade face aos raios UV.

Tendo sido desenvolvidos ensaios de envelhecimento artificial acelerado adequados a avaliar o comportamento de telhas cerâmicas sob a acção nevoeiro salino será possível alargar o estudo a mais tipos de telhas cerâmicas de outros fabricantes.

Será também possível realizar estudos paramétricos para avaliar a influência da variação dos parâmetros de fabrico, como a temperatura, os tipos de moldes e as composições das matérias-primas, na durabilidade das telhas e assim contribuir para melhoria do processo de fabrico.

Nos estudos paramétricos varia-se um parâmetro de cada vez permitindo identificar e otimizar os parâmetros que mais influenciam as propriedades das telhas e a sua durabilidade.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - BENDER, Willi; HÄNDLE, Frank; et al. - **Brick and tile making**. Procedures and operating practice in the heavy clay industries. Berlin, Bauverlag GmbH, 1982.
- 2 - SERRA e SOUSA, A. Vaz; ABRANTES, Vítor - **Manual de aplicação de telhas cerâmicas**. Coimbra, APICER/CTCV/IC FEUP, 1998.
- 3 - VEIGA DE OLIVEIRA, Ernesto et. al. - **Construções primitivas em Portugal**. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1988, 2ª ed..
- 4 - VEIGA DE OLIVEIRA, Ernesto; GALHANO, Fernando - **Arquitectura Tradicional Portuguesa**. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1992.
- 5 - LNEC - **Informação para projecto de coberturas de telhado**. Relatório. Lisboa, LNEC, 1966.
- 6 - NP EN 1304 - **Telhas cerâmicas e acessórios - Definições e especificações dos produtos**. IPQ, 2007.
- 7 - /P/ - Leis, Decretos-Lei, etc. - *Decreto-Lei n.º 4/2007, de 8 de Janeiro*, que altera e republica o Decreto-Lei n.º 113/93. Lisboa, Imprensa Nacional-Casa da Moeda, 2007. **Directiva Comunitária 89/106/CEE**, correntemente designada por **Directiva dos Produtos de Construção (DPC)**.
- 8 - LNEC. **Qualidade de Produtos e Empreendimentos** [em linha]. Disponível em <http://www.lnec.pt/gpe>.
- 9 - ABREU, Miguel e LUCAS, José de Carvalho - **Terminologia geral sobre patologia da construção**. Relatório 326/02 - DM/SCPN. Lisboa, LNEC, 2002.
- 10 - EUROPEAN COMMISSION. **Guidance paper F: durability and the construction products directive** (concerning the Construction Products Directive - 89/106/EEC). (Revision December 2004).
- 11 - ASTM C 1167-03 - **Standard specification for clay roof tiles**. ASTM International. USA, 2003.
- 12 - ALBANO, Jean-René - **La maintenance des bâtiments en 250 fiches pratiques**. 2^e édition, Paris, Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), 2005.
- 13 - HENRIQUES, F. M. A.; RODRIGUES, J. D.; AIRES-BARROS, L.; PROENÇA, N. - **Materiais pétreos e similares. Terminologia das formas de alteração e degradação**. ITPRC 2. Lisboa, LNEC, 2004.
- 14 - NP EN 539-2 - **Telhas cerâmicas para colocação descontínua - Determinação das características físicas. Parte 2: Ensaio de resistência ao gelo**. IPQ, 2007.
- 15 - NF P 31-301 - **Tuiles de terre cuite à emboîtement ou à glissement**. AFNOR, 1985.

- 16 - RODRIGUES, J. D.; GONÇALVES, T. D. - **Sais solúveis nas construções históricas. Introdução e relato sumário.** Coleção Comunicações, CS 32, 1-13. Lisboa, LNEC, 2006.
- 17 - CIB/RILEM - **Prediction of Service Life of Building Materials and Components - Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components.** Joint CIB W080 / RILEM TC 140. CIB Publication 295. Rotterdam, The Netherlands, CIB, 2004.
- 18 - GOUDIE, A.; VILES, H. - **Salt Weathering Hazards.** Chichester, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 1997.
- 19 - CHANG, R. - **Química.** 5ª Edição, Amadora, Editora McGraw-Hill de Portugal, Lda, 1994.
- 20 - ARNOLD, A.; ZEHNDER, K. - **Salt weathering on monuments.** In: Proc. 1st Int. Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Ed. F. Zezza, Bari, 31-58, 1990.
- 21 - HENRIQUES, Fernando M. A. - **Humidade em Paredes.** Coleção Edifícios, nº 1. Lisboa, LNEC, 1994.
- 22 - LUBELLI, B. - **Sodium chloride damage to porous building materials.** PhD thesis, Technical University of Delft, The Netherlands, 2006.
- 23 - WINCKLER, E. M. - **Stone in architecture.** Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- 24 - GONÇALVES, T. D. - **Salt crystallization in plastered or rendered walls.** Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- 25 - RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E. - **Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern.** Earth Surface Processes and Landforms, 24, 191-209, 1999.
- 26 - CORRENS, C. W. - **Growth and dissolution of crystals under linear pressure.** Discussions of the Faraday Society, 5, 267-271, 1949.
- 27 - WINKLER, E. M.; SINGER, P. C. - **Crystallization pressure of salts in stone and concrete.** Geological Society of America Bulletin, 83, (11), 3509-3514, 1972.
- 28 - COOKE, R. U.; GIBBS, G. B. - **Crumbling Heritage - Studies of Stone Weathering in Polluted Atmospheres.** Atmospheric Environment, 8, (7), 1355-1356, 1994.
- 29 - CHAROLA, A. E. - **Salts in the deterioration of porous materials: An overview.** Journal of the American Institute for Conservation, 39, (3), 327-343, 2000.
- 30 - EVERETT, D. H. - **The thermodynamics of frost damage to porous solids.** Transactions of the Faraday Society, 57, 1541-1551, 1961.

-
- 31 - SCHERER, G. - **Crystallization in pores**. Cement and Concrete Research, 29, (8), 1347- 1358, 1999.
- 32 - SCHERER, G. - **Stresses from crystallization of salt**. Cement and Concrete Research, 34, (9), 1613-1624, 2004.
- 33 - PUHRINGER, J. - **Salt disintegration**. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1983.
- 34 - SNETHLAGE, R.; WENDLER, E. - **Moisture cycles and sandstone degradation**. In: Saving our architectural heritage: the conservation of historic stone structures (Eds. N.S. Baer and R. Snethlage). J. Wiley & Sons, Chichester, UK, 7-24, 1997.
- 35 - LUCAS, J. A. Carvalho - **Revestimentos de paredes independentes do suporte executados com telhas cerâmicas planas**. ITMC 21. Lisboa. LNEC, 1994.
- 36 - CARDOSO, Armando - **Manual de Cerâmica**. Lisboa, Livraria Bertrand, S.A.R.L., s.d.
- 37 - GOMES, Celso Figueiredo - **Argilas. O que são e para que servem**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.
- 38 - VELHO, José; GOMES, Celso; ROMARIZ, Carlos - **Minerais industriais**. Geologia, Propriedades, Tratamentos, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados. Coimbra, G.C.-Gráfica de Coimbra, Lda., 1998.
- 39 - SMITH, William F. - **Princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3ª ed., Alfragide, Editora MCGRAW-HILL de Portugal, Lda., 1998.
- 40 - SOUZA SANTOS, P. - **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª ed., rev e ampl., vol. 1 e 3, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1989, 1992.
- 41 - LNEC E 219 - **Prospecção geotécnica de terrenos. Vocabulário**. Especificação LNEC, 1968.
- 42 - CULTRONE, Giuseppe et. al. - **Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks**. Journal of the European Ceramic Society, 24, 547–564, 2004.
- 43 - RAIMONDO, M. et. al. - **Durability of clay roofing tiles: the influence of microstructural and compositional variables**. Journal of the European Ceramic Society, 24, 3121–3128, 2009.
- 44 - MAAGE, M. - **Frost resistance and pore size distribution in bricks. Part 1**. Ziegelindustrie Int., 1990, **9**, 472–481, 1990.
- 45 - MAAGE, M. - **Frost resistance and pore size distribution in bricks. Part 2**. Ziegelindustrie Int., 1990, **10**, 582–588, 1990.
- 46 - ARNOTT, M. - **Investigation of freeze-thaw durability**. In NRC-IRC Report N. CR 5680.1, Nat. Res. Council of Canada, Ottawa, Canada, 1990.
-

- 47 - FRANKE, L. and BENTRUP, H. - **Evaluation of the frost resistance of bricks in regard to long service life. Part 1.** Ziegelindustrie Int., 1993, **7–8**, 483–492, 1993.
- 48 - FRANKE, L. and BENTRUP, H. - **Evaluation of the frost resistance of bricks in regard to long service life. Part 2.** Ziegelindustrie Int., 1993, **9**, 528–536, 1993.
- 49 - KOROTH, R., FAZIO, P. and FEDMAN, D. - **Development of new durability index for clay bricks.** *J. Architect. Eng.*, 1988, **9**, 87–93, 1988.
- 50 - KOROTH, R., FAZIO, P. and FEDMAN, D. - **Comparative study of durability indices of clay bricks.** *J. Architect. Eng.*, 1998, **9**(1), 26–33, 1998.
- 51 - ROBINSON, G. C. - **Relation between physical properties and durability of commercial marketed bricks.** *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1995, **56**(12), 1071–1075, 1995.
- 52 - VINCENZINI, P. - **Le prove di laboratorio nella previsione del comportamento al gelo dei materiali ceramici per l'edilizia.** *Ceramurgia*, 1974, **3**, 176–188, 1974.
- 53 - RILEM COMMISSION 25 - PEM (Protection et érosion des monuments) - **Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Recommandations provisoires.** *Matériaux et Constructions*, Paris, vol. 13, n° 75, Maio-Junho 1980.
- 54 - NP 499 - **Telhas cerâmicas - Ensaio de absorção de água.** IPQ, 1968.
- 55 - NP EN 771-1 - **Especificações para unidades de alvenaria. Parte 1: Tijolos cerâmicos para alvenaria.** IPQ, 2006.
- 56 - ASTM C 67- 05 - **Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile.** ASTM International. USA, 1999.
- 57 - NP EN 13755 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da absorção de água à pressão atmosférica.** IPQ, 2005.
- 58 - EN 14617-1 - **Agglomerated stone - Test methods. Part 1: Determination of apparent density and water absorption.** CEN, 2005.
- 59 - EN 1015-10 - **Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.** CEN, 1999.
- 60 - NP EN 772-7 - **Métodos de ensaio para elementos de alvenaria. Parte 7: Determinação da absorção de água em água fervente de elementos cerâmicos para alvenaria.** IPQ, 2000.
- 61 - NP EN ISO 10545-3 - **Pavimentos e revestimentos cerâmicos - Parte 3: Determinação da absorção de água, da porosidade aberta, da densidade relativa aparente e da massa volúmica global.** IPQ, 2001.

- 62 - NP EN 1936 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta.** IPQ, 2001.
- 63 - EN 772-4 - **Methods of test for masonry units. Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units.** CEN, 1998.
- 64 - EN 993-1 - **Methods of test for dense shaped refractory products. Part 1: Determination of bulk density, apparent porosity and true porosity.** CEN, 1995.
- 65 - NP EN 772-3 - **Métodos de ensaio para elementos de alvenaria. Parte 3: Determinação do volume líquido e da percentagem de furação em elementos cerâmicos para alvenaria por pesagem hidrostática.** IPQ, 2000.
- 66 - NP EN 772-13 - **Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural).** IPQ, 2002.
- 67 - NP EN 539-1 - **Telhas cerâmicas para colocação descontínua - Determinação das características físicas. Parte 1: Ensaio de impermeabilidade.** IPQ, 2007.
- 68 - ASTM D4404-84 - **Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry.** ASTM International. USA, 2004.
- 69 - BORGES, J. F. - **A utilização dos ultrasons para o estudo das propriedades dos materiais.** Memória LNEC nº 50. Lisboa, LNEC, 1954.
- 70 - NP EN 14579 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da velocidade de propagação do som.** IPQ, 2007.
- 71 - NP EN 538 - **Telhas cerâmicas para colocação descontínua - Determinação da resistência à flexão.** IPQ, 1997.
- 72 - NP EN 14147 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência ao envelhecimento por nevoeiro salino.** IPQ, 2007.
- 73 - NP EN 12370 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência à cristalização de sais.** IPQ, 2001.
- 74 - NP EN 13919 - **Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência ao envelhecimento por acção de SO₂ na presença de humidade.** IPQ, 2007.
- 75 - RILEM TC 127-MS - **Tests for masonry materials and structures. Recommendations.** Materials and Structures, Paris, vol. 31, nº 205, January-February 1998.
- 76 - LNEC E 251 - **Inertes para argamassas e betões. Ensaio de reactividade com os sulfatos em presença de hidróxido de cálcio.** Especificação LNEC, 1985.

- 77 - NP EN 1367-2 - **Ensaaios das propriedades térmicas e de meteorização dos agregados. Parte 2: Ensaio do sulfato de magnésio.** IPQ, 2002.
- 78 - ASTM C88-99a - **Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.** ASTM International. USA, 1999.
- 79 - ISO 9227 - **Corrosion tests in artificial atmospheres – salt spray test.** ISO, 2006.
- 80 - NP EN ISO 11997-1 - **Tintas e vernizes. Determinação da resistência a condições cíclicas de corrosão. Parte 1: Molhagem (nevoeiro salino)/secagem/humidade (ISO 11997-1:2005).** IPQ, 2007.
- 81 - GONÇALVES, T. D.; RODRIGUES, J. D. - **Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behaviour. Part I: Fundamentals, scope and accuracy of the method.** Journal of Cultural Heritage, 2006, 7, 79-84, 2006.

